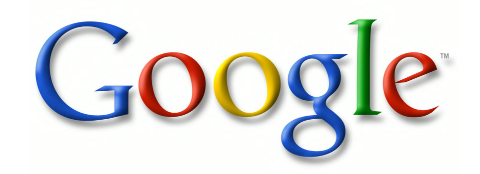





SIGILL : COLL : HARVARD : CANTAB : NOV : ANGL : 1650.
CHRISTO ET ECCLESIAE





BIBLIOTHÈQUE DE LA NATURE
publiée sous la direction
DE M. GASTON TISSANDIER

LA PHYSIQUE MODERNE

LES PRINCIPALES APPLICATIONS DE L'ÉLECTRICITÉ



Tramway électrique de l'Exposition d'électricité de Paris (1881).

BIBLIOTHÈQUE DE LA NATURE

LA PHYSIQUE MODERNE

LES PRINCIPALES APPLICATIONS

DE L'ÉLECTRICITÉ

PAR

E. HOSPITALIER

INGÉNIEUR DES ARTS ET MANUFACTURES

Les sources d'électricité
L'éclairage électrique — Téléphone, Microphone et Photophone
Les moteurs électriques
La transmission de la force à distance
La distribution de l'électricité.

DEUXIÈME ÉDITION

ENTIÈREMENT REFONDUE

Avec 120 Figures dans le texte

Et 4 planches hors texte.

PARIS

G. MASSON, ÉDITEUR

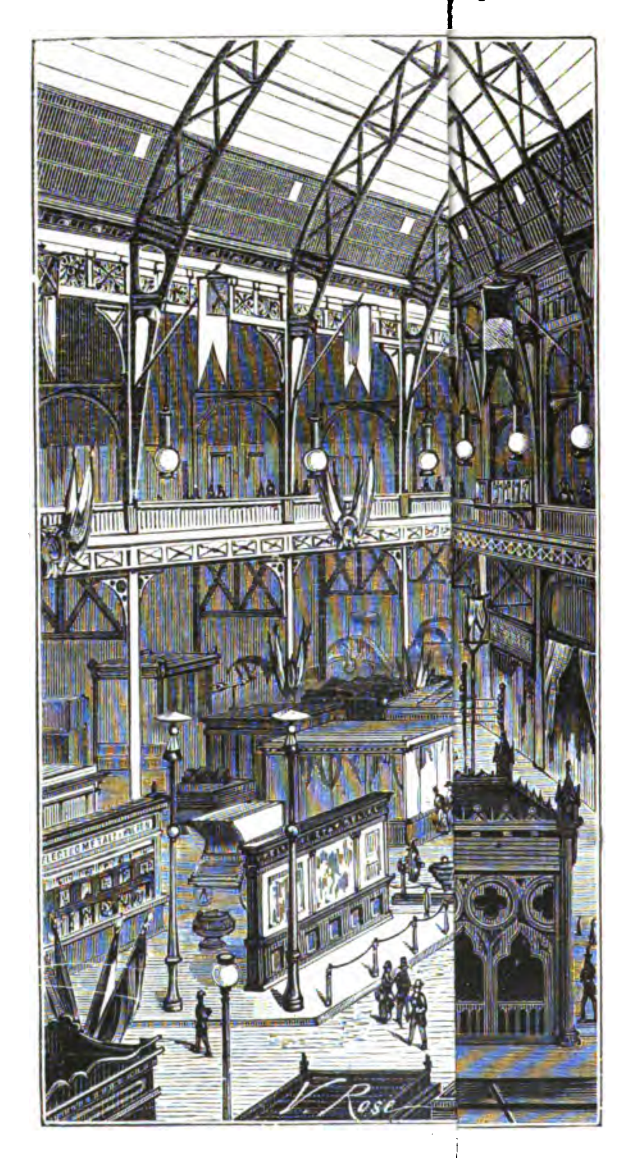
LIBRAIRE DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE

120, Boulevard Saint-Germain, en face de l'École de Médecine

1882

4314-81 — Corbeil, typ. Crété.

E. Hospitalier. page vii.



VUE D'ENSEMB

PRÉFACE

DE LA DEUXIÈME ÉDITION

Il y a quelques années à peine, un livre comme celui-ci n'aurait eu aucune raison d'être, les sujets traités dans ses chapitres successifs n'existaient pas pour la plupart. Aujourd'hui, il faut être d'une grande concision pour exposer en un seul volume les *Principales applications de l'électricité*.

A peine quelques mois ont séparé la première édition de cet ouvrage de la deuxième, les faits nouveaux ont été cependant si considérables, qu'il a fallu soumettre ce livre à des remaniements complets pour le tenir au courant du progrès.

Pendant le court intervalle de temps qui s'est écoulé entre les deux éditions, des événements considérables se sont produits dans le domaine de la science ; l'Exposition internationale d'électricité et le Congrès des Électriciens ont eu lieu à Paris. — On a vu là, dans le Palais des Champs-Élysées, toutes les nouvelles conquêtes de l'Électricité, et toutes les merveilles que cette féconde branche de la Physique a su accomplir [1].

Comme toutes les forces de la nature, l'électricité est un agent puissant, invisible et mystérieux dont on ignore la véritable nature. On peut cependant affirmer qu'elle est impondérable, et toutes ses manifestations prouvent qu'elle constitue un mode particulier de mouvement, comme la chaleur et la lumière. Il y a là une éclatante confirmation de l'*unité des forces physiques* réunies par la physique moderne en ces deux principes : MATIÈRE ET MOUVEMENT.

[1] Nous représentons à titre de souvenir l'aspect d'ensemble de l'Exposition d'électricité au Palais de l'industrie (pl. I).

Comme confirmation de l'unité des forces physiques, l'électricité se transforme dans chacune des forces qui sont susceptibles de lui donner naissance. Source de chaleur et concentrée en un point, elle produit la lumière électrique dont les applications s'accroissent de jour en jour ; source de travail chimique, on lui doit la galvanoplastie, la dorure, l'argenture, les décompositions chimiques; source de travail mécanique, elle a donné naissance au télégraphe électrique, dans lequel les forces mises en jeu sont très faibles, et au transport électrique de la force motrice à distance dont la puissance est scientifiquement illimitée.

Ce dernier problème est assurément un des plus importants que l'industrie ait réalisés, et le jour n'est pas éloigné où les forces naturelles pourront être utilisées grâce à l'électricité ; les chutes d'eau de la France tiennent à elles seules en réserve une force motrice de 35 millions de chevaux-vapeur. Quel prodigieux instrument de travail pour l'avenir !

Joignant à sa puissance une souplesse, une délicatesse extrêmes, l'électricité a permis de transmettre à distance sous forme de courant, toutes les vibrations si complexes qui constituent le son articulé ; M. Graham Bell a créé le téléphone, dont les fils couvrent déjà les villes de leurs réseaux.

La description de ces applications multiples et merveilleuses de l'électricité fait l'objet de ce livre, dont la deuxième édition, nous l'espérons, recevra du public le même accueil que la première.

E. H.

Décembre 1881.

LA PHYSIQUE MODERNE

LES PRINCIPALES APPLICATIONS

DE L'ÉLECTRICITÉ

PREMIÈRE PARTIE

LES SOURCES D'ÉLECTRICITÉ

Le premier phénomène électrique fut constaté par *Thalès de Milet* qui reconnut, 600 ans avant l'ère chrétienne, les propriétés acquises par l'ambre frotté d'attirer les corps legers; mais ce fut *Otto de Guéricke* qui, vers le milieu du dix-septième siècle, aperçut le premier l'*étincelle électrique*.

L'identité entre la foudre et l'électricité ne fut démontrée qu'un siècle plus tard, en 1752, par l'illustre *Franklin*, et cinquante ans après, *Volta*, en créant la pile électrique, inaugura une ère nouvelle dans l'histoire de l'électricité qui, depuis quelques années, a vu s'accroître dans une si grande mesure le champ de ses applications.

Tout le dix-huitième siècle est rempli des études et des découvertes faites en électricité *statique*, alors que la découverte de Volta jette les premières bases des nombreuses découvertes de l'électricité *dynamique*.

Aujourd'hui ces distinctions tendent à disparaître et nous verrons par la suite comment on transforme l'électricité dite statique en électricité dynamique et réciproquement.

Au point de vue des applications de l'électricité, le seul qui nous intéresse dans cet ouvrage, les *machines électriques* (à frottement, à plateau, etc.) n'ont pas donné de résultats, et les courants de haute tension qu'elles fournissent n'ont servi jusqu'ici qu'aux expériences amusantes, aux démonstrations de l'enseignement et aux recherches purement scientifiques.

Aussi ne nous y arrêterons-nous pas, renvoyant le lecteur aux traités de physique élémentaire, dans lesquels tous ces phénomènes sont longuement décrits. L'examen des différents modes de produire l'électricité dite *dynamique* et des principales applications qu'elle a reçues rentre seul dans notre cadre, qu'il suffira, et au delà, à remplir d'une façon complète.

Classification des sources électriques. — Tous les appareils employés jusqu'ici à la production d'un courant électrique peuvent se diviser en trois grandes classes parfaitement distinctes, caractérisées par la nature des actions mises en jeu :

1° Appareils dans lesquels on utilise l'action chimique et qui transforment directement l'*affinité chimique* en électricité. Ce sont les *piles* ou *batteries galvaniques ;*

2° Appareils qui transforment directement la *chaleur* en électricité. Ce sont les *piles thermo-électriques ;*

3° Appareils qui transforment directement le *travail* en électricité. Ce sont les machines *électro-dynamiques*, qui se divisent en machines magnéto-électriques et dynamo-électriques.

Ce sont donc trois classes distinctes d'appareils que nous étudierons séparément ; dans un chapitre spécial, nous passerons en revue les transformateurs électriques qui ne sont pas, à proprement parler, des générateurs électriques, mais qui donnent au courant électrique des propriétés particulières en changeant le rapport de ses qualités, ou qui servent à l'*accumuler*, à l'emmagasiner sous forme d'énergie chimique, pour l'utiliser ensuite à volonté.

CHAPITRE I

LES PILES ÉLECTRIQUES

On peut se faire une idée assez exacte d'une pile en la comparant à un *foyer de chaleur*, le foyer d'une chaudière à vapeur par exemple. Ce foyer produit, par la combustion ou combinaison chimique de la houille avec l'oxygène de l'atmosphère, de la chaleur qui élève un certain volume des produits de la combustion à une certaine température. La quantité de chaleur produite par la combustion servira en partie à produire un certain volume de vapeur à une certaine pression.

Le foyer de notre chaudière n'est autre chose que la pile elle-même ; le combustible est le zinc, le comburant est l'eau acidulée, qui, par leur combinaison chimique, produisent un courant électrique ayant une certaine *tension* ou force électro-motrice et une certaine *intensité*, comme la vapeur a un volume et une pression parfaitement déterminés.

Cette comparaison grossière est cependant assez exacte ; elle présente l'avantage de faciliter l'intelligence des phénomènes souvent complexes qui se passent dans la pile, et de rendre pour ainsi dire *visibles* des faits dont l'explication théorique présente souvent une grande obscurité.

La forme la plus simple que l'on puisse donner à une pile est celle de la pile à un seul liquide. Un élément comprend alors :

1° Un vase servant à contenir les éléments actifs;

2° Un corps attaqué (le zinc est presque exclusivement employé), qui formera le pôle *négatif* de la pile : c'est le combustible ;

3° Un liquide, de l'eau acidulée par l'acide sulfurique par exemple : c'est le comburant ;

4° Une lame inattaquable, cuivre, charbon ou platine, dont le rôle est de former le pôle positif de la pile en prenant l'électricité du liquide par conductibilité.

La figure 1 représente un élément simple ainsi constitué : un vase en verre V, une lame de zinc Z formant le pôle *négatif* de la pile, un liquide qui est de l'eau renfermant $\frac{1}{10}$ de son poids d'acide sulfurique, et une lame de cuivre C prenant, par conductibilité, la polarité du liquide pour former le pôle *positif*.

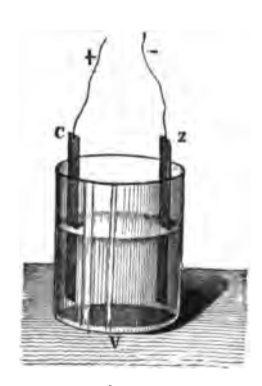


Fig. 1. — Élément simple.

En réunissant par un conducteur les deux lames Z et C, ce fil sera traversé par un *courant électrique*.

Ce courant électrique peut être figuré très simplement en le considérant comme une circulation d'électricité continue allant du pôle négatif au pôle positif à l'intérieur de la pile, et du pôle positif au pôle négatif à l'extérieur, dans les fils qui les réunissent.

Négligeons pour un instant les phénomènes secondaires qui se produisent à l'intérieur de l'élément simple que nous venons de constituer, et étudions d'abord les propriétés de ce courant circulant dans le circuit extérieur.

Tension, force électro-motrice, intensité du courant électrique, résistance du conducteur. — Lorsqu'une lame de zinc se trouve en contact avec l'acide, il se produit entre eux une *différence de tension électrique* qui constitue la *force électro-motrice* de l'élément.

La *tension* du courant correspond à la *pression* qui fait circuler l'eau dans un tuyau de conduite. L'analogie est complète, car l'intensité du courant dans le circuit est analogue au volume d'eau débité par la conduite. Le conducteur formant le circuit extérieur n'est autre chose que le tuyau de la

conduite; ce conducteur offre une résistance au courant électrique comme le tuyau offre une résistance à l'écoulement de l'eau.

Il y a donc, dans une circulation électrique donnée, trois éléments distincts qui la caractérisent :

1° La *pression* du courant, *tension*, *force électro-motrice* ou *différence des potentiels* : c'est la force en vertu de laquelle le courant électrique s'établit (1) ;

2° Le *volume* du courant, c'est son *intensité* ou la quantité d'électricité qui traverse le circuit dans l'unité de temps ;

3° La *résistance* du circuit, c'est la résistance qu'apporte le conducteur à la circulation du courant, eu égard à ses dimensions et à sa nature.

Loi de Ohm. — La loi qui relie la résistance du conducteur, la tension et l'intensité du courant dans un circuit électrique, a été établie mathématiquement par *Ohm*, célèbre savant allemand, en 1827, et expérimentalement par le physicien français *Pouillet*.

Cette loi peut s'exprimer très simplement par la formule suivante :

$$I = \frac{E}{R}$$

formule dans laquelle

I représente l'intensité du courant,

E, la force électro-motrice ou différence des potentiels aux deux extrémités du circuit,

R, la résistance électrique du circuit.

Cette formule se traduit ainsi en langage ordinaire : *L'intensité d'un courant sur un circuit électrique est proportionnelle à la force électro-motrice, et inversement proportionnelle à la résistance.*

Nous retrouverons cette loi à chaque instant dans l'examen des sources électriques et des applications de l'électricité.

Unités électriques. — Nous savons qu'un courant qui traverse un circuit électrique d'une certaine résistance possède une certaine tension et une intensité déterminée. Pour avoir une idée exacte de ce courant, il faut mesurer les éléments de sa circulation : *tension*, *intensité* et *résistance*. La mesure des éléments électriques est une question très délicate et très difficile, et il n'entre pas dans notre cadre de l'aborder ; mais nous devons dire quelques mots des unités auxquelles on s'est arrêté après de longues recherches, et qui paraissent devoir être universellement adoptées dans un temps très rapproché.

En 1863, l'Association britannique nomma une commission composée des plus éminents électriciens de l'Angleterre pour établir un système

(1) Plus exactement, la force électro-motrice est la *cause* du courant, la différence des potentiels est l'expression de la mesure de cette force. Le mot force électromotrice s'applique à une pile ou à une machine, le mot différence de potentiels à deux points d'un circuit. L'emploi d'un mot pour l'autre est dû à une substitution, fréquente dans le langage ordinaire, de cause à effet, ou inversement.

coordonné de mesures électriques. Après huit années de travaux et d'expériences, le comité publia un rapport très détaillé et détermina les unités électriques en se basant sur des considérations dans le détail desquelles nous n'avons pas à entrer ici. Le Congrès international des électriciens, réuni à Paris le 15 septembre 1881 a sanctionné l'emploi de ces unités, sous réserve de petites modifications dont nous tenons compte ici-même.

Les unités adoptées par la commission anglaise sont fondées sur le centimètre, le gramme et la seconde. Elles dérivent toutes les unes des autres par des définitions quelquefois très complexes, mais qui présentent l'avantage de bien établir l'origine de ces unités et d'en faciliter le rétablissement dans le cas où cela deviendrait nécessaire.

Mais ces unités présentent un avantage encore plus grand sur les unités empiriques qui les ont précédées. L'emploi de ces unités dans les calculs n'entraîne aucun coefficient de réduction autre que des multiples de dix. L'introduction de ces coefficients de réduction provient de ce que les unités primitives, auxquelles le comité anglais a donné le nom d'*unités absolues*, étaient un peu petites pour la pratique, ce qui entraînait l'emploi de grands nombres dans les calculs; on leur a substitué des *multiples décimaux* de ces unités, multiples auxquels on a donné des noms spéciaux qui rappellent ceux d'hommes célèbres dans la science électrique.

L'*unité de résistance* adoptée est l'OHM. Elle correspond à la résistance d'un fil de fer de 4 millimètres de diamètre et de 100 mètres environ de longueur. En France, on avait l'habitude, habitude qui tend à disparaître, de compter les résistances électriques en *kilomètres de fil télégraphique*. Le kilomètre de fil vaut environ 10 ohms. On emploie en Allemagne l'*unité Siemens* représentée par la résistance d'une colonne de mercure purifié d'un mètre de longueur et de un millimètre carré de section; elle est à peu près égale à l'ohm (1).

L'*unité de tension* ou de *force électro motrice* porte le nom de VOLT. Elle correspond à très peu près à la force électro-motrice développée par un élément Daniell dont la valeur exacte en volts est 1,079. On a employé aussi quelquefois l'unité thermo-électrique de Gaugain dont la force électro-motrice est $\frac{1}{182,6}$ du volt et $\frac{1}{197}$ de l'élément Daniell.

C'est la force électro-motrice développée par un couple thermo-électrique cuivre-bismuth dont on maintient une des soudures à 0° et l'autre à 100°.

Cette unité, aujourd'hui à peu près abandonnée, présente l'avantage, au point de vue scientifique, d'avoir une très grande constance et de pouvoir toujours être réalisée *pratiquement*. On préfère cependant l'emploi du volt dont il n'existe pas d'*étalon matériel*, à cause de la simplicité que son emploi introduit dans les calculs.

(1) Une Commission internationale sera chargée de déterminer, pour la pratique, la longueur exacte d'une colonne de mercure de un millimètre carré de section dont la résistance à 0° centigrade représentera matériellement la valeur de l'Ohm; le nombre trouvé par la Commission s'écartera sans doute fort peu de celui admis actuellement 1me,0475.

Unité d'intensité. — Elle est définie par la formule de *Ohm* :

$$I = \frac{E}{R}.$$

Elle prend le nom d'AMPÈRE et a la même valeur que l'ancien *Weber* anglais. C'est l'intensité d'un courant qui traverse un conducteur dont la résistance est de 1 ohm lorsque la différence de potentiel ou de pression électrique aux extrémités de ce conducteur est de 1 volt.

Unité de quantité. — Elle prend le nom de COULOMB. C'est la quantité d'électricité qui traverse, *pendant une seconde*, un conducteur de 1 ohm de résistance avec une différence de potentiel de 1 volt.

On voit de suite la relation entre l'intensité d'un courant et la quantité d'électricité. Un courant, dont l'intensité est de un ampère, débite par seconde une quantité d'électricité égale à un coulomb. Un courant, dont l'intensité est de $\frac{1}{100}$ d'ampère, laissera passer une quantité d'électricité égale à un coulomb dans 100 secondes, etc.

Les courants employés en télégraphie varient entre 5 et 10 milli-ampères, ceux qui servent à la lumière électrique varient entre 1 et 50 ampères ; enfin dans certaines opérations électro-chimiques, l'intensité du courant atteint 1000 ampères. On a là intérêt à se servir de courants très intenses, parce que la quantité de métal déposé est proportionnelle à l'intensité du courant, c'est-à-dire à la quantité d'électricité qui passe pendant l'unité de temps.

Loi de Joule. — La loi découverte par le célèbre physicien anglais *Joule* s'exprime par la formule :

$$W = I^2Rt.$$

La quantité de chaleur ou de travail W *développé dans un circuit électrique est proportionnelle au carré de l'intensité du courant* I, *à la résistance du circuit* R *et au temps t.*

En remplaçant R par sa valeur tirée de la formule de Ohm, on trouve :

$$W = IE.$$

Le travail est proportionnel à l'intensité du courant et à la force électromotrice. Nous retrouvons encore ici l'analogie avec les cours d'eau pour lesquels le travail est proportionnel au volume et à la pression ou hauteur de chûte.

Unité de capacité. — Elle prend le nom de FARAD. C'est la capacité d'un condensateur qui renferme un coulomb d'électricité, lorsqu'il est chargé au potentiel de un volt. La quantité d'électricité qu'il renferme est proportionnelle à la pression, comme dans un réservoir d'air comprimé, le poids d'air renfermé est proportionnel à la pression en supposant bien entendu que l'air suive la loi de Mariotte. — En pratique, le farad est une quantité trop grande, et l'unité adoptée en pratique, est le *microfarad* qui en est la $\frac{1}{1000000}$ partie.

En résumé, nous avons cinq quantités électriques et cinq unités corres-

pondantes : 1° pression ou *force électro-motrice*, exprimée en *Volts*; 2° *résistance* des conducteurs, en *Ohms*; 3° débit, volume ou *intensité* du courant en *Ampères*; 4° *quantité* d'électricité en *Coulombs*; 5° *capacité* d'un condensateur en *Microfarads*.

Nous avons insisté tout particulièrement sur ces définitions parce que ces idées, très philosophiques cependant, ne sont pas encore entrées dans l'enseignement élémentaire français, tandis qu'elles sont classiques en Angleterre. La distribution de l'électricité et la transmission électrique de la force à distance, dont nous parlerons à la fin de ce volume, ne peuvent faire de progrès véritablement scientifiques que si on se rend bien compte des relations qui existent entre les différents éléments électriques et mécaniques en jeu dans ces phénomènes.

Classification des piles. — Les piles peuvent, à défaut d'une classification absolument méthodique, se diviser en plusieurs groupes parfaitement distincts :

1° Par la nature de *l'électrode soluble;* dans la pratique cependant, ce caractère n'a aucune importance, car la presque totalité des piles en usage emploie le *zinc* comme électrode soluble;

2° Par la nature du *comburant* qui est tantôt un acide, l'acide sulfurique le plus souvent, ou l'acide acétique; tantôt un sel, comme le sel marin, le sel ammoniac, le sulfate de mercure, le sulfate de plomb, etc., etc.;

3° Par la nature du *dépolarisant*, qui peut être du sulfate de cuivre, de l'acide azotique, du peroxyde de plomb, du peroxyde de manganèse ; dans certains cas, le dépolarisant et le comburant forment une seule dissolution dans le même liquide, comme par exemple la pile de Poggendorf, dans laquelle le zinc et le charbon sont plongés dans une dissolution de bichromate de potasse et d'acide sulfurique.

Sans nous astreindre à les passer toutes en revue, nous examinerons les principales par groupes de même nature, en suivant l'excellente classification de M. Alfred Niaudet dans son *Traité élémentaire de la pile électrique*.

PILES A UN SEUL LIQUIDE.

Depuis la pile de *Volta*, on a construit un grand nombre de piles à un seul liquide ; la pile à couronne de tasses, la pile de *Cruikshank*, celle de *Wollaston*, la pile en hélice, la pile de *Muncke*, ne sont que des modifications du principe fécond découvert par le physicien italien.

La polarisation rapide de ces éléments les a fait abandonner à peu près complètement dans la pratique, et ils sont d'ailleurs décrits dans tous les traités de physique.

Dans certaines piles à un seul liquide, le cuivre a été remplacé par des électrodes d'autres substances.

En 1849, M. *Walker* employa des électrodes de charbon, d'autres employèrent le fer comme électrode inattaquée.

En 1840, un physicien anglais, *Smée*, indiqua le platine platiné pour faciliter le dégagement des bulles d'hydrogène ; *Walker* le remplaça, en 1857, par du charbon platiné : sous cette forme, la pile à un seul liquide est encore très employée en Angleterre pour le service des chemins de fer.

Aujourd'hui, dans les piles à un seul liquide, on entoure l'électrode négative ou pôle positif de substances de nature à faciliter le dégagement de l'hydrogène ou sa combinaison avec l'oxygène.

Dans d'autres piles à un seul liquide, on fait varier la nature du liquide. On a employé l'acide chlorhydrique, mais sans succès ; l'acide nitrique qui est trop cher et qui, comme l'acide chlorhydrique, dégage des vapeurs nuisibles ; M. *Pulvermacher* a employé l'acide acétique pour exciter ses chaînes galvaniques.

Indépendamment des liquides acides, on a fait usage du sel marin ; les piles zinc-charbon et sel marin sont encore très employées en Suisse pour les sonneries d'appartement.

Dans sa bouée électrique M. *Duchemin* emploie l'eau de mer ; la pile *Bagration*, le sel ammoniac ; M. *Stöhrer*, une solution d'alun, etc., etc.

Quel que soit le choix habile de liquide et d'électrode que l'on puisse faire, et le nombre de ces combinaisons est pour ainsi dire infini, il est fort douteux qu'on y revienne dans l'avenir, sous réserve des piles à mélanges dépolarisants dont nous décrirons quelques types.

Polarisation des piles, piles à deux liquides. — Reprenons notre élément simple de la figure 1, constitué par une lame de zinc, une lame de cuivre et de l'eau acidulée par de l'acide sulfurique. Si nous fermons le courant de cette pile sur un galvanomètre, nous produirons une déviation qui ira en s'affaiblissant jusqu'à devenir presque nulle dans certaines conditions. Cet affaiblissement de l'intensité du courant, quelles que soient les causes qui le produisent, prend le nom de *polarisation*.

La polarisation de la pile tient à plusieurs causes dont voici les principales. L'impureté du zinc, en créant de petits couples secondaires au sein même du zinc, est une cause qui tend à diminuer la force électro-motrice du couple. Kemp proposa en 1839 l'emploi du zinc amalgamé qui fit disparaître cet inconvénient, et, à la même époque Grove lut un mémoire à l'Académie des sciences pour expliquer l'importance du zinc amalgamé dans les piles. Aujourd'hui on amalgame les zincs de toutes les piles. L'appauvrissement du liquide par l'action chimique tend aussi à affaiblir le courant, en partie par l'affaiblissement de l'action chimique, et en partie par l'augmentation de résistance opposée par le liquide au passage du courant.

Le transport du zinc sur le cuivre par le courant tend aussi à diminuer son intensité parce que le cuivre recouvert de zinc et attaqué par l'acide de l'élément, produit un nouveau courant en sens inverse du courant principal.

Mais la cause la plus puissante de la polarisation est le dépôt d'hydrogène qui s'effectue sur le cuivre.

L'oxydation du zinc et sa transformation en sulfate de zinc ont pour effet de produire une certaine quantité d'hydrogène qui se dépose sur la lame électro-négative (cuivre, platine ou charbon). Ce dépôt de gaz sur la lame de cuivre oppose un obstacle matériel

à la transmission du courant par les bulles de gaz. D'autre part, cet hydrogène constitue avec l'oxygène dégagé sur l'autre électrode une sorte de pile à gaz, et, par suite, un dégagement électrique en sens inverse du premier. Une pile théoriquement parfaite dans laquelle on pourrait faire disparaître toutes ces causes de polarisation fournirait un courant *constant*, et mériterait véritablement le nom de *pile constante*. En pratique, on donne le nom de piles constantes à toutes les combinaisons voltaïques qui ont pour but d'empêcher ou de diminuer le dépôt d'hydrogène sur la lame électro-négative. Nous verrons, en passant en revue les piles actuellement en usage, les différents procédés par lesquels on réalise plus ou moins ce désidératum.

Pour continuer notre comparaison entre une pile, foyer d'électricité, et un foyer de chaleur, nous dirons que la polarisation dans les piles est un phénomène analogue au manque de tirage dans une cheminée. Ce manque de tirage produit un abaissement de la température, une diminution dans la quantité de chaleur dégagée et une mauvaise utilisation du combustible. Dans la pile ces effets se traduisent par une diminution de la force électromotrice, de l'intensité du courant et par l'usure du zinc presque en pure perte.

Conditions théoriques d'une pile parfaite. — Voici, d'après M. Fleeming-Jenkin, les conditions essentielles qu'une telle pile devrait remplir :

1° Elle devrait posséder une grande force électro-motrice ;

2° Elle devrait avoir une résistance intérieure faible et constante ;

3° Sa force électro-motrice devrait être constante quel que soit le courant produit au point de vue de l'intensité ;

4° Les matières employées devraient être à bon marché ;

5° La pile ne devrait rien dépenser lorsqu'elle ne produit pas de courant, c'est-à-dire lorsqu'elle est en circuit ouvert ;

6° Sa disposition devrait être telle que l'on puisse vérifier facilement son état, son fonctionnement et ajouter des substances nouvelles lorsqu'elles sont nécessaires.

Aucune pile connue ne réalise toutes ces conditions au plus haut degré. Les exigences spéciales à chaque application doivent guider dans le choix d'un élément convenable pour l'usage qu'on se propose d'en faire.

Piles à deux liquides à sulfate de cuivre. — L'emploi du sulfate ou de l'azotate de cuivre comme dépolarisant fut indiqué pour la première fois par *Becquerel*, en 1829, à la suite de longues et nombreuses expériences. Les résultats obtenus furent très satisfaisants et il s'en servit toujours depuis cette époque.

C'est seulement en 1836 que *Daniell* imagina la pile qui porte son nom. Les piles Becquerel et Daniell ne différaient que par la nature de la cloison poreuse, qui était en baudruche dans la pile de Daniell, et en kaolin dans l'élément Becquerel, auquel on substitua plus tard des vases poreux en terre de pipe dégourdie.

Tout le monde connaît la disposition de l'élément Daniell, nous n'y reviendrons pas. Sa force électro-motrice est de 1,079 *volt*, lorsque l'acide sulfurique est étendu de quatre fois son poids d'eau, et sa résistance intérieure varie, suivant la grandeur des éléments, leur état, etc., entre un et vingt *ohms*. Cependant quelques piles médicales, dont les dimensions sont très petites, pour qu'elles soient facilement transportables, ont jusqu'à 100 et même 200 ohms de résistance intérieure.

On a donné un grand nombre de formes à la pile Daniell.

On a construit des piles à ballon, des piles à cuivre extérieur, des piles à auges. La pile Daniell à auges construite par M. *Muirhead* est très employée en Angleterre, et le Post-Office de Londres en a plus de 20,000 pour son service télégraphique.

M. *Carré* a construit une pile Daniell dans laquelle le vase poreux était remplacé par un vase de papier parcheminé qui diminuait considérablement la résistance intérieure de la pile et a permis de faire de la lumière électrique avec 60 éléments. C'est la première fois que la pile Daniell a pu être employée pour cette application qui demande, comme on le sait, un courant d'une certaine intensité.

M. *Minotto*, de Venise, a imaginé une pile à sable très em-

ployée en Italie et dans l'Inde anglaise : la séparation des deux liquides provient de leur différence de densité ; le zinc et le cuivre sont formés de deux disques plats horizontaux, le cuivre en dessous. Le sulfate de cuivre est séparé du sable par une feuille de papier buvard ou un morceau de toile. Cette pile offre une assez grande résistance intérieure, mais rend d'excellents services en télégraphie.

M. *Trouvé* a modifiée la pile Daniell, dans le but de l'appliquer aux usages médicaux, en la construisant sans liquide, ou du moins sans liquide libre pouvant se renverser ou fuir des vases qui le contiennent.

Pile Callaud. — L'idée de séparer les deux liquides de la

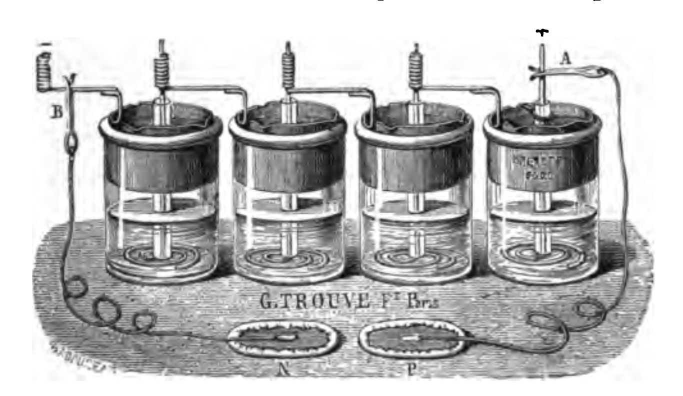


Fig. 2. — Pile Callaud, modèle Trouvé.

pile Daniell en se fondant sur leur différence de densité a été trouvée en même temps par M. *Callaud* en France, et *Meidinger* en Allemagne. Il en existe actuellement un très grand nombre de modèles. Celui que nous représentons (fig. 2) présente une très grande simplicité, et par suite un bon marché en rapport avec cette simplicité. Le vase de verre n'a que 12 centimètres de haut et 7 de diamètre. Le zinc est retenu par trois saillies ou plis faits avec une pince. Le cuivre est formé par une spirale de fil de cuivre plate qui se relève verticalement au milieu du vase ; cette partie verticale est protégée par un petit tube de verre. La liaison des éléments a lieu au moyen d'un petit boudin qui ter-

mine le fil de cuivre soudé au zinc et dans lequel s'engage le fil de cuivre qui constitue le réophore de l'élément suivant.

Pour les applications médicales des courants continus, M. *Onimus* emploie une pile de petite dimension dans laquelle le vase poreux est un tube de verre fermé par une bourre et renfermant le sulfate de cuivre. M. *J. Seure*, de Saint-Germain-en-Laye, se sert de tubes en U dont la partie inférieure est remplie par de la silice formant cloison poreuse. Ce sont là des piles à grande résistance intérieure et par suite à faible débit.

Pile de sir William Thomson. — Cette pile à grande surface est formée par des auges en bois doublées de plomb à l'intérieur. La plaque de cuivre est au fond, et le zinc, en forme de grille, repose sur des tasseaux de bois; les plaques zinc et cuivre sont ainsi très rapprochées, la pile a donc une très faible résistance qui ne dépasse pas 0,1 *ohm*. C'est donc une pile à grand débit. Sept ou huit de ces éléments superposés forment une pile énergique et constante appliquée par sir W. Thomson au moteur du mouse-mill de son *siphon-recorder*.

Pile de M. E. Reynier. — Dans cette pile le dépolarisant



Fig. 3. — Pile de M. E. Reynier.

est toujours le sulfate de cuivre, mais le zinc plonge dans une solution de soude caustique additionnée d'une dizaine d'autres sels qui rendent sa composition fort complexe. Le vase poreux est en parchemin, le zinc dans le vase poreux, le cuivre à l'exté-

rieur. Dans le modèle plat représenté ci-contre (fig. 3) dont la hauteur est de 20 centimètres et la capacité de 3 litres, la force électromotrice initiale est 1,47 *volt*, la résistance intérieure 0,075 *ohm*.

M. Reynier avait espéré, dans le principe, régénérer industriellement et économiquement sa pile pour l'appliquer aux petits moteurs électriques et à l'éclairage privé. Il y a renoncé

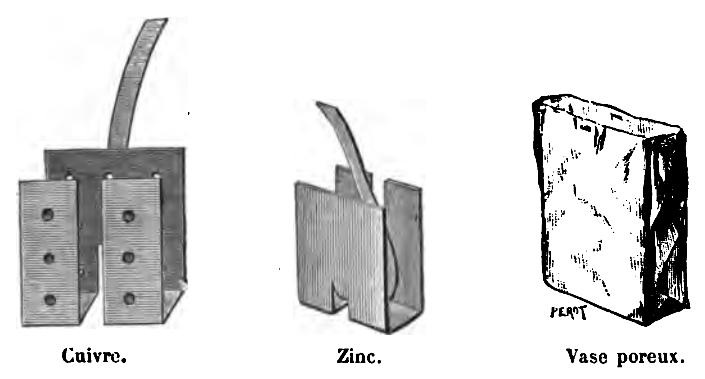


Fig. 4. — Détails de la pile Reynier.

depuis pour chercher la solution dans les accumulateurs dont nous parlerons plus loin.

Piles à sulfates. — On a constitué des piles dans lesquelles le sulfate de cuivre et la lame de cuivre sont remplacés par une lame d'un autre métal et le sulfate correspondant; mais ces appareils n'ont, pour la plupart, aucun intérêt pratique. La plus importante est celle au sulfate de mercure de Marié-Davy. Le sulfate de cuivre est remplacé par le sulfate de mercure et la lame de cuivre par une plaque de charbon. L'action chimique est analogue à celle de la pile Daniell, sauf que le sulfate de mercure est à peu près insoluble. On a aussi employé des piles à sulfate de mercure sans vase poreux, et, dans la pile à renversement de M. *Trouvé*, c'est la dissolution de mercure qui forme à la fois le dépolarisant et le comburant.

Pile hermétique au bisulfate de mercure de M. Trouvé. — La pile représentée en grandeur naturelle (fig. 5) est formée d'un couple zinc-charbon renfermé dans un étui d'*ébonite* ou

caoutchouc durci, fermé hermétiquement. Le zinc et le charbon n'occupent que la moitié supérieure de l'étui, l'autre moitié est occupée par le liquide excitateur, qui est une solution de sulfate de protoxyde de mercure. Tant que l'étui est vertical, le zinc en haut, le couple ne plonge pas dans le liquide, il n'y a donc pas de production d'électricité ; en renversant l'étui, on immerge le zinc et le charbon circulaire, le courant se produit aussitôt pour cesser dès qu'on redresse l'étui. De là le nom de *pile à renversement* donné aussi à ce petit appareil. M. Trouvé l'a appliqué à différents appareils d'induction, à son explorateur électrique et

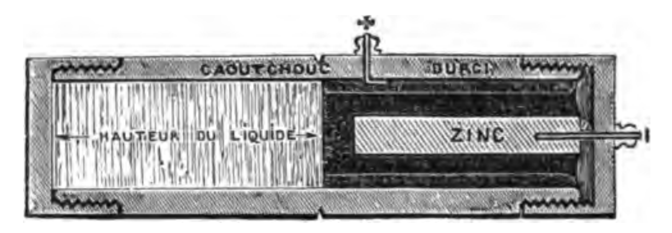


Fig. 5. — Pile hermétique de M. Trouvé

à ses petits bijoux électriques. (Voir les *Récréations scientifiques* de M. Gaston Tissandier, bibliothèque de *la Nature*.)

MM. *Gaiffe* et *Ruhmkorff* emploient aussi des piles à sulfate de mercure à un seul liquide pour exciter les bobines d'induction de leurs petits appareils médicaux de poche.

Piles à sulfate de plomb. — Le sulfate de plomb a été employé pour la première fois par *Becquerel*, puis en 1860 par *Marié-Davy* qui donna à l'élément la forme de la pile Daniell sans vase poreux de sir William Thomson. M. Edmond Becquerel a ramené la pile à la forme habituelle des éléments Daniell.

Aujourd'hui ces piles sont abandonnées à cause de l'énorme résistance intérieure des éléments.

Piles à acides. — La première pile à acide nitrique comme dépolarisant date de 1839 et est due à un éminent physicien anglais, *Grove*. Dans la pile de Grove, l'électrode négative ou pôle positif est constituée par une lame de platine placée dans une solution d'acide azotique concentré plongeant dans le vase

poreux. Grove avait proposé de remplacer le platine par du charbon de bois ou de cornue, mais il ne donna pas suite à cette idée qui fut reprise, en 1843, par un physicien allemand, *Bunsen*, de Heidelberg.

Toutes les piles *Bunsen* construites jusqu'en 1849 étaient faites avec du charbon aggloméré moulé en cylindre creux placé avec l'acide dans le cylindre *extérieur*, et le zinc placé à l'intérieur du vase poreux.

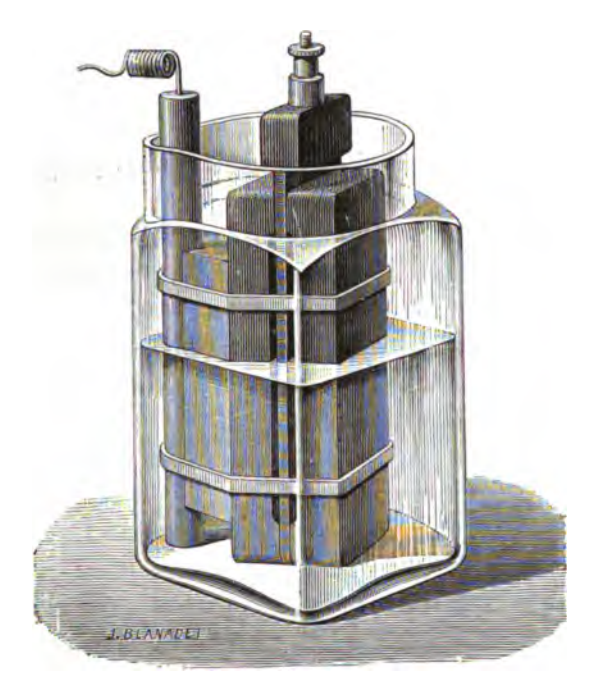


Fig. 6. — Pile Leclanché à *agglomérés*.

C'est seulement en 1849 que M. *Archereau* imagina d'employer du charbon de cornue taillé en prisme et placé dans le vase poreux avec le zinc *roulé* placé à l'extérieur. De sorte que la pile connue universellement sous le nom de pile Bunsen est bien réellement l'invention de M. Archereau.

La pile Bunsen a reçu depuis une foule de modifications qui n'ont pu faire abandonner le type primitif imaginé par Archereau.

Ruhmkorff a cependant construit une pile Bunsen à éléments plats qui présente deux avantages, une petite résistance intérieure due au rapprochement et à la grande surface des électrodes, et un faible volume d'acide nitrique, à cause du peu d'épaisseur et de capacité du vase poreux dont le charbon, formé d'une large plaque, occupe environ le tiers.

M. *Tommasi* a modifié aussi la pile de Bunsen dans le but de supprimer les vapeurs nitreuses et de rendre l'appareil pratique pour l'éclairage domestique. Nous attendons encore la réalisation de ses belles promesses.

On a aussi essayé comme dépolarisant les acides chlorique, chromique, chlorhydrique, l'eau régale, etc., mais la pratique n'a pas sanctionné ces piles, qui sont restées jusqu'ici à l'état d'expériences de laboratoire.

Piles à oxydes. — Puisque la dépolarisation dans les piles s'opère par l'oxydation de l'hydrogène, on peut obtenir ce résultat en employant des oxydes faciles à décomposer.

De la Rive a employé le peroxyde de plomb et le peroxyde de manganèse, il y a plus de trente ans déjà, mais ses piles ne furent pas mises en usage et étaient tombées dans l'oubli, lorsque M. Leclanché imagina la pile qui porte son nom et qui est aujourd'hui universellement employée.

Pile au peroxyde de manganèse de M. Leclanché. — Dans les premiers modèles, le charbon était placé au milieu du vase poreux rempli d'un mélange à parties égales de peroxyde de manganèse et de charbon de cornue. Le zinc est placé dans le vase extérieur rempli à moitié d'une solution de chlorhydrate d'ammoniaque.

Dans le nouveau modèle représenté (fig. 6), le vase poreux est supprimé. On applique contre le charbon, à l'aide de jarretières en caoutchouc, des *agglomérés* formés d'un mélange de 40 parties de pyrolusite, 55 de charbon et 5 de résine gomme-laque comprimés à 300 atmosphères et chauffés en même temps à 100°.

Suivant la puissance de la pile, on met un, deux ou trois agglo-

mérés contre le charbon. Le modèle de la figure 6 appliqué aux sonneries ordinaires en a deux. Pour les allumoirs électriques, on emploie, pour diminuer la résistance intérieure, des lames de zinc au lieu de crayons.

L'action chimique n'a lieu que lorsque le circuit est fermé. La force électro-motrice varie entre 1,4 et 1,5 *volts*.

La pile Leclanché ne contient pas de substances vénéneuses, ne répand pas de vapeurs acides ni d'odeur appréciable, les matières qu'elle emploie sont d'un prix peu élevé et résistent aux froids les plus intenses.

La dépolarisation obtenue par le bioxyde de manganèse n'est pas complète et, en court circuit, la force électro-motrice baisse rapidement. Mais elle se dépolarise très rapidement en circuit ouvert.

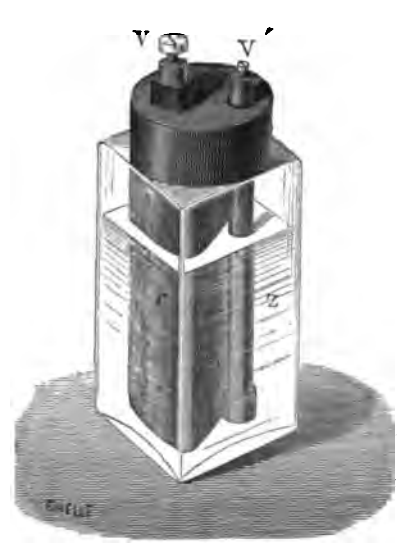


Fig. 7. — Pile Clamond et Gaiffe.

Pour les sonneries d'appartement, les piles Leclanché peuvent durer quatre et cinq années, sans autre préoccupation que celle d'ajouter de temps en temps un peu d'eau dans le vase extérieur, pour remplacer celle qui se perd par l'évaporation.

Pile au sesquioxyde de fer et au chlorhydrate d'ammoniaque de MM. Clamond et Gaiffe. — Cette pile ne diffère de celle de M. Leclanché que par la substitution de l'oxyde de fer à l'oxyde de manganèse. Lorsque le circuit est fermé, le chlorure d'ammonium ou chlorhydrate d'ammoniaque attaque le zinc et forme avec lui du chlorure double d'ammonium et de zinc ; l'ammonium mis en liberté se porte sur le sesquioxyde de fer qu'il décompose en s'emparant d'une partie de son oxygène et forme avec

ce dernier de l'ammoniaque libre qui disparaît par l'évaporation.

Cet élément, représenté figure 7, se compose d'un vase en verre, d'un prisme de charbon C, aggloméré et poreux, contenant le sesquioxyde de fer dans ses pores, et d'une baguette de zinc amalgamé Z. Un bouchon mastiqué ferme le vase et empêche l'évaporation du liquide qui est une dissolution de chlorhydrate d'ammoniaque.

La force électro-motrice du couple est de 1,2 *volts;* il peut être employé pour les batteries médicales à courant continu, les sonneries électriques et les télégraphes domestiques, mais son énorme résistance intérieure en fait une source électrique peu puissante.

Piles à chlorures. — Dans ces piles, on effectue la dépolarisation par le chlore au lieu de l'effectuer par l'oxygène.

Nous signalons seulement pour mémoire la pile au chlorure de platine indiquée par *Daniell*, qui, d'une grande valeur au point de vue théorique, serait trop coûteuse en pratique.

Pile au chlorure d'argent de M. Warren de la Rue. — C'est M. *Marié-Davy* qui s'est servi le premier du chlorure d'argent comme dépolarisant, en 1860, mais M. *Warren de la Rue* en fait usage dans sa pile depuis 1868, et les perfectionnements qu'elle a reçus depuis cette époque sont dus aux recherches faites par ce savant sur les courants de haute tension.

La figure 8 représente l'ensemble d'un groupe de dix éléments montés en tension, et la figure 9, les différentes parties qui constituent chaque élément.

Le vase extérieur est un cylindre de 13 centimètres de long et de 3 centimètres de diamètre ; l'électrode soluble est un crayon de zinc *non amalgamé* (c'est une rare exception à l'emploi du zinc amalgamé). M. de la Rue emploie de préférence le zinc de la Vieille-Montagne, à cause de sa bonne qualité : un trou percé à la partie supérieure de ce crayon de zinc sert à recevoir le petit ruban d'argent qui forme le pôle positif de l'élément suivant, le contact est assuré par une petite goupille de laiton C légèrement conique. La seconde électrode est formée d'un ruban d'argent

autour duquel on a fait fondre un cylindre de chlorure d'argent AgCl. Ce bâton de chlorure d'argent est placé dans un petit cylindre de papier-parchemin A qui évite les contacts accidentels.

Le liquide est une solution de 23 grammes de chlorhydrate d'ammoniaque pour un litre d'eau. Le vase extérieur est fermé par un bouchon de paraffine qui est un des meilleurs isolants connus et qui, par le fait qu'elle est anti-hygrométrique, em-

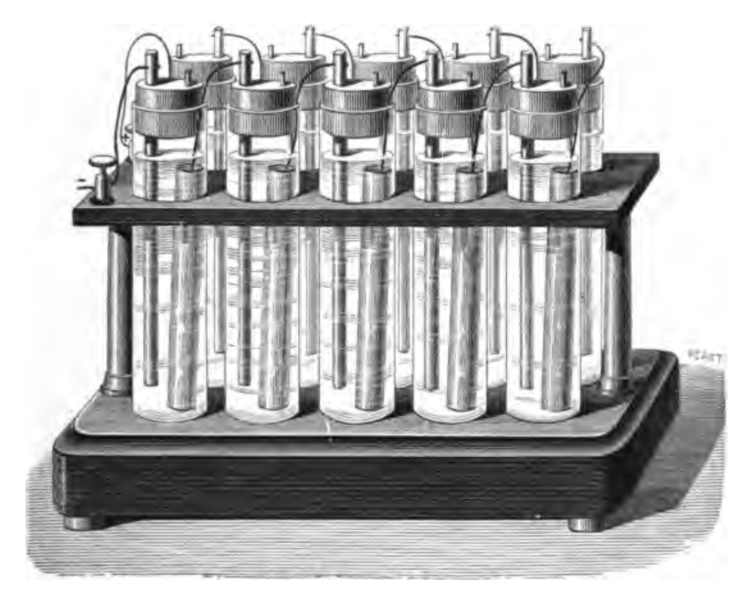


Fig. 8. — Pile de M. Warren de la Rue.

pêche l'eau qui pourrait être répandue à sa surface de s'étaler et d'établir des dérivations nuisibles.

L'action est fort simple : le zinc se dissout et remplace l'argent dans le chlorure ; l'argent provenant de la décomposition se dépose en une masse poreuse, d'abord à la surface, puis peu à peu dans la masse du chlorure d'argent. Cette pile ne donne lieu à aucune action locale tant que le circuit extérieur n'est pas fermé. Le comburant est ici un corps solide, le chlorure d'argent, qui ne se dissout pas dans le liquide en contact avec lui, mais qui fournit le chlore nécessaire à la dissolution du zinc.

La force électro-motrice varie entre 1 et 1,07 *volts;* sa résistance intérieure dépend du temps de service et des dimensions de l'élément. Dans le type que nous venons de décrire, la résislance varie entre entre 2,7 et 4,3 *ohms.*

M. *Gaiffe* emploie aussi la pile au chlorure d'argent pour les courants continus, et pour les appareils médicaux d'induction ; ces éléments sont de très petite dimension et hermétiquement clos dans des boîtes d'ébonite fermées par des couvercles à vis.

M. *Duchemin* a proposé en 1866 l'emploi du perchlorure de fer comme dépolarisant, mais il ne se produit dans l'élément qu'une dépolarisation incomplète, et le zinc se recouvre bientôt de dépôts peu conducteurs.

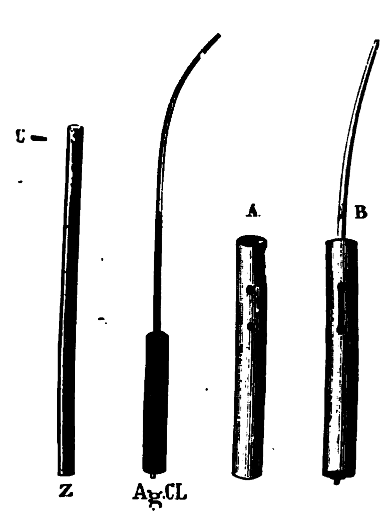


Fig. 9. — Détails d'un élément de la pile Warren de la Rue.

M. *Marié-Davy* a essayé le chlorure de plomb , mais la force électro-motrice de cet élément est faible ; le chlorure de plomb est assez cher, la pile ne présente donc pas d'avantage spécial.

Dans la pile de M. *Niaudet*, le zinc plonge dans une solution de chlorure de sodium, et le charbon dans une solution de chlorure de chaux qui joue ici le rôle de dépolarisant.

Le chlorure de chaux du commerce, employé comme décolorant et désinfectant, est un mélange de chaux, d'hypochlorite de chaux et de chlorure de calcium. L'acide hypochloreux que contient l'hypochlorite est composé d'oxygène et de chlore qui peuvent se combiner tous deux avec l'hydrogène pour former de l'eau et de l'acide chlorhydrique.

Ce dernier acide attaque la chaux et produit du chlorure de calcium ; tous les corps qui prennent naissance étant solubles, le

liquide garde sa limpidité. Lorsque le circuit est ouvert, le zinc n'est pas attaqué, il n'y a donc pas de dépense.

La force électro-motrice de cet élément est de 1,6 *volts*. Le chlorure de chaux ayant une odeur très désagréable, le vase qui contient la pile doit être clos à l'aide d'un bouchon recouvert de cire.

Piles à mélanges dépolarisants. — Nous avons examiné jusqu'ici des piles dans lesquelles on entoure l'électrode électro-négative (cuivre, platine, charbon ou argent) de matières abandonnant facilement de l'oxygène ou du chlore, qui se combinent avec l'hydrogène dégagé et produisent une dépolarisation partielle ou totale. Une autre méthode consiste à placer autour de cette électrode un mélange des deux substances dont la réaction réciproque produit soit de l'oxygène, soit du chlore.

Les piles de ce genre le plus en usage sont les piles à bichromate de potasse.

M. *Poggendorff* est le premier qui ait eu l'idée d'employer un mélange de bichromate de potasse et d'acide sulfurique dans l'eau distillée pour dépolariser l'électrode conductrice.

Depuis, la pile au bichromate a reçu différents perfectionnements qui ont rendu son emploi souvent très commode et très pratique.

La force électro-motrice des éléments atteint 2 *volts*, elle est plus grande que celle des éléments Bunsen et Grove, mais, malgré le mélange, il se produit une polarisation rapide, surtout lorsque le circuit extérieur est peu résistant.

Les éléments en présence produisent des réactions complexes qui se traduisent finalement par la formation d'un alun de chrome qui, produit un courant en sens inverse de celui de l'élément, il en résulte une polarisation énergique et un épuisement rapide du liquide.

Pile Grenet. — En 1856, M. *Grenet* avait établi un système de ventilation à l'intérieur du liquide qui empêchait le dépôt du chrome et détruisait par l'action de l'air sur l'hydrogène naissant la polarisation qu'il pouvait causer.

En pratique, il n'y avait rien à attendre d'un système aussi compliqué, et la pile qui porte aujourd'hui le nom de pile Grenet n'est autre chose que la pile à ballon ou pile-bouteille, bien connue de tout le monde, et qui rend de si grands services pour les expériences de courte durée.

Les piles au bichromate de potasse ont la propriété de donner un courant énergique sans répandre aucune odeur, à la condition de ne les employer que pour des travaux ou des expériences de courte durée et de retirer les zincs du liquide après chaque expérience.

M. *Ducretet* construit dans ce but un modèle composé d'éléments à bichromate suspendus par des cordes qui s'enroulent sur un treuil. Les éléments plongent dans une solution composée de :

Bichromate de potasse...............	200 grammes.
Eau ordinaire......	2 litres.
Acide sulfurique ordinaire..	150 à 200 grammes.

On peut ajouter 5 grammes de bisulfate de mercure pour entretenir les zincs dans un bon état d'amalgamation.

M. *Gaiffe* construit une pile à treuil analogue dans laquelle les charbons et les zincs sont fixés sur une traverse d'une façon rigide, ce qui empêche le balancement des éléments pendant qu'on les soulève, et évite ainsi les projections du liquide acide.

D'autres modèles de pile au bichromate de potasse ont été combinés par M. *Trouvé* dans lesquels on peut facilement démonter les éléments, les nettoyer, réamalgamer les zincs et les remplacer s'il en est besoin.

M. *Camacho* dispose les éléments en cascade et fait circuler le mélange dépolarisant ; l'électrode de charbon est placée dans un vase poreux rempli de fragments de charbon de cornue ; on obtient ainsi une surface énorme de l'électrode, ce qui rend la polarisation très lente.

M. *Clovis Baudet* a aussi combiné une pile à laquelle il a donné le nom un peu prétentieux d'*impolarisable*, et dans la-

quelle le vase poreux qui renferme le zinc porte deux autres petits vases qui lui sont soudés latéralement : l'un de ces petits vases renferme de l'acide sulfurique, l'autre, percé de trous, des cristaux de bichromate de potasse ; il établit ainsi une *provision* de substances qui peut bien maintenir la solution dans un état de concentration suffisant, mais cela ne nous explique pas comment la provision ainsi constituée peut empêcher la polarisation de se produire.

M. *Fuller* a disposé une pile au bichromate, employée en Amérique et en Angleterre pour la télégraphie, dans laquelle le zinc placé au milieu du vase poreux plonge dans du mercure qui maintient son amalgamation.

Du rôle des piles dans les applications de l'électricité. Travail maximum disponible. — Dans toutes les piles que nous venons de passer en revue, nous trouvons toujours le zinc comme combustible. Le travail disponible dans le circuit extérieur d'une pile dépend du nombre de calories produites par la combinaison du zinc avec le comburant. En la considérant à ce point de vue, la pile qui rend des services précieux en télégraphie, pour les sonneries d'appartement, les appareils médicaux, les expériences de laboratoire, etc., est absolument impropre à fournir de *grandes quantités* d'énergie électrique. Le zinc est un combustible cher ; à poids égal il coûte quinze fois plus que la houille et développe cinq fois moins de chaleur. Dans les piles à acide azotique le dépolarisant coûte trois et quatre fois plus cher que le zinc. Ce fait seul suffit à expliquer l'abandon presque complet des piles pour l'éclairage électrique et les recherches qui se font en ce moment en thermo-électricité et avec les machines électro-dynamiques.

Malgré la complication qu'amène l'emploi des machines, on les préfère pour cet usage ainsi que pour d'autres applications que nous étudierons par la suite.

Il faut donc réserver les piles pour des travaux où l'électricité joue un rôle plus par la rapidité et la délicatesse de son action que par sa puissance. Nous en avons de remarquables applica-

tions en télégraphie et en téléphonie. Pour l'éclairage électrique et les moteurs, là où il faut fournir des calories et du travail, la pile a l'inconvénient de brûler un combustible trop cher, le zinc, et de le brûler trop lentement, ce qui oblige à employer un nombre considérable d'éléments pour n'obtenir qu'un faible travail disponible. On se souvient des installations monumentales de MM. Tommasi et Baudet à l'Exposition d'électricité, installations à peine suffisantes pour fournir une lumière que les appréciations les plus sympathiques estimaient ne pas dépasser 15 à 20 becs Carcel, avec des charbons d'un diamètre exagérément petit.

A moins d'une révolution complète dans la production de l'électricité par l'action chimique directe, les principes actuellement connus ne permettent pas d'établir une pile à la fois puissante et économique pour les applications qui exigent ces deux qualités réunies à un très haut degré.

CHAPITRE II

PILES THERMO-ÉLECTRIQUES

Les *piles thermo-électriques* sont des appareils qui transforment directement la chaleur en électricité. La découverte de ce fait, de la plus haute importance, fut faite en 1821 par *Seebeck*, professeur à Berlin. En soudant sur une lame de bismuth les

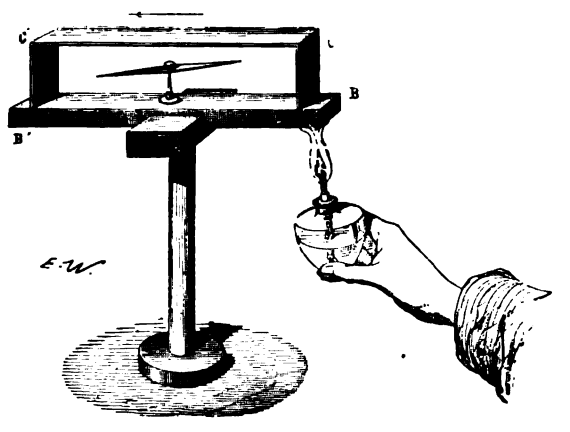


Fig. 10. — Expérience de Seebeck.

extrémités d'une lame de cuivre recourbée de manière à laisser un espace vide entre les deux lames, Seebeck reconnut qu'en chauffant une des soudures de ce système métallique, une aiguille aimantée, placée entre les deux lames, se trouvait déviée, le courant allant toujours de la soudure chaude à la soudure froide, à

travers la lame de cuivre, et de la soudure froide à la soudure chaude à travers la lame de bismuth.

Becquerel attribue la production du courant dans les couples thermo-électriques à l'inégale propagation du calorique à travers les différentes parties du circuit hétérogène constitué par les deux métaux différents.

Quels que soient les métaux qui entrent dans la composition des couples thermo-électriques, ils se distinguent facilement des couples hydro-électriques par la nature des courants engendrés. Dans la pile, en effet, chaque couple ou élément possède une forte tension variant de 1 à 2 volts et une assez grande résistance intérieure (variant de 0,2 à 15 et 20 ohms); dans le couple thermo-électrique, au contraire, pour une différence de température que nous supposons être de 100° entre les soudures, la force électro-motrice, très variable avec la nature des éléments constitutifs et la température *moyenne* des deux soudures, varie entre $\frac{1}{20}$ et $\frac{1}{800}$ de un volt, tandis que la résistance intérieure de l'élément est extrêmement faible. On exprime ce fait en disant que les piles thermo-électriques donnent de la quantité et peu de tension, aussi faut-il en réunir un grand nombre en tension pour avoir une certaine force électro-motrice.

Becquerel, en faisant des expériences entre 0° et 20° sur différents métaux, a pu les classer dans un ordre tel que chacun d'eux est positif par rapport à ceux qui le précèdent et négatif par rapport à ceux qui le suivent. Voici l'ordre des métaux expérimentés par Becquerel :

Bismuth, platine, argent, étain, plomb, cuivre, or, zinc, fer, antimoine. Il semblerait, *à priori*, qu'en prenant, pour former un couple thermo-électrique les éléments les plus éloignés de la série, on puisse obtenir, pour une différence de température donnée, la plus grande force électro-motrice. D'autres considérations d'ordre théorique et pratique montrent qu'il n'en est rien.

La pratique indique le choix de métaux, d'alliages ou de substances dans lesquelles la différence de température des soudu-

res puisse être maintenue au plus haut degré possible sans altérer la pile. Au point de vue du prix d'établissement d'une pile, la nature des métaux employés joue aussi un certain rôle.

La loi des courants thermo-électriques qui établit que la force électro-motrice est proportionnelle à la différence des températures n'est exacte qu'à la condition de faire intervenir une considération spéciale à la *température moyenne* des deux soudures et au *point neutre* qui varie avec la nature des métaux employés. Un exemple fera mieux comprendre qu'une explication théorique ce qu'il faut entendre par point neutre dans un couple thermo-électrique.

Prenons, par exemple, un couple thermo-électrique constitué par les deux métaux cuivre et fer. Supposons que la soudure froide du couple soit à 70° et la soudure chaude à 450°. Le couple ainsi constitué ne sera traversé par *aucun courant*, bien que la différence de température des deux soudures atteigne 380°. Cela tient à ce que le *point neutre* du fer par rapport au cuivre est à 210°, c'est-à-dire qu'à 210° le courant thermo-électrique fourni par les deux métaux *change de signe*, et comme la température moyenne entre les deux soudures est précisément égale à 210°, il en résulte la production de deux courants égaux en tension, mais de signes contraires, qui, par conséquent, se détruisent.

Tout en maintenant une grande différence de température entre les deux soudures d'un couple thermo-électrique, il faut donc éviter que les températures soient, l'une supérieure et l'autre inférieure au *point neutre* correspondant aux deux métaux qui composent le couple, car on ne recueillerait alors qu'uu courant différentiel, susceptible de devenir nul lorsque la température moyenne des deux soudures correspond au point neutre (1).

Dans un couple thermo-électrique, si la différence des températures est constante, le courant est lui-même constant, car

(1) Voir, pour plus de détails, *Electricity and magnetism* de Fleeming-Jenkin et les *Philosophical transactions*, 1856, page 708.

il ne se produit pas de polarisation ni de variation dans la résistance du couple. La force électro-motrice d'une pile thermo-électrique est proportionnelle au nombre des éléments qui la constituent, absolument comme pour les piles hydro-électriques.

Ces principes une fois posés, nous allons passer en revue les différents couples thermo-électriques employés dans la pratique.

Œrsted et *Fourier* ont construit la première pile thermo-électrique proprement dite ; elle se composait de petits barreaux de bismuth et d'antimoine soudés à la suite les uns des autres en ligne droite. Les barreaux de bismuth se terminaient par une partie soudée qui plongeait dans de la glace à zéro, tandis que les autres soudures étaient portées à une température de 200 à 800° par de petites lampes.

Nobili a simplifié la pile de Fourier en repliant les barreaux en zigzag, il a pu faire rentrer 50 éléments dans un cube de 2 centimètres de côté. Melloni l'a appliquée à son thermo-multiplicateur.

Pile de Marcus. — Elle est fondée sur l'emploi d'alliages au lieu de métaux simples, l'un formé de nickel, cuivre et zinc, connu sous le nom d'*argent allemand*, l'autre d'antimoine, de zinc et de bismuth ; les soudures homologues pouvaient être chauffées chacune par un petit bec Bunsen. Wheatstone et M. Ladd construisirent chacun une pile avec les alliages préconisés par Marcus et purent obtenir, le premier des étincelles, l'incandescence d'un fil de platine et la décomposition de l'eau dans un voltamètre ; le second put faire fonctionner une bobine de Ruhmkorff donnant 38 millimètres d'étincelle.

Pile de Farmer. — M. *Farmer*, de Boston, avait présenté en 1868 une pile analogue à celle de Marcus dont les lames positives étaient constituées par un alliage de 10 parties de cuivre, 6 de zinc et 6 de nickel, et les lames négatives par un alliage de 12 parties d'antimoine, 5 de zinc et 1 de bismuth ; les deux métaux étaient vissés l'un dans l'autre, les jonctions inférieures chauffées par un bec de gaz et les jonctions supérieures refroidies par un courant d'eau.

Pile de M. Ed. Becquerel. — En 1865, M. *Ed. Becquerel*, en faisant des recherches sur le pouvoir thermo-électrique du sulfure de cuivre artificiel, trouva que cette substance chauffée à 200 ou 300° est fortement positive, le sulfure artificiel ne fondant qu'à plus de 1000°. On peut l'employer à des températures très élevées. Le métal que lui associa M. Ed. Becquerel est du maillechort (90 de cuivre et 10 de nickel), la pile est chauffée au gaz et refroidie par une circulation d'eau (1).

Pile thermo-électrique de Noë. — L'usage de cette pile

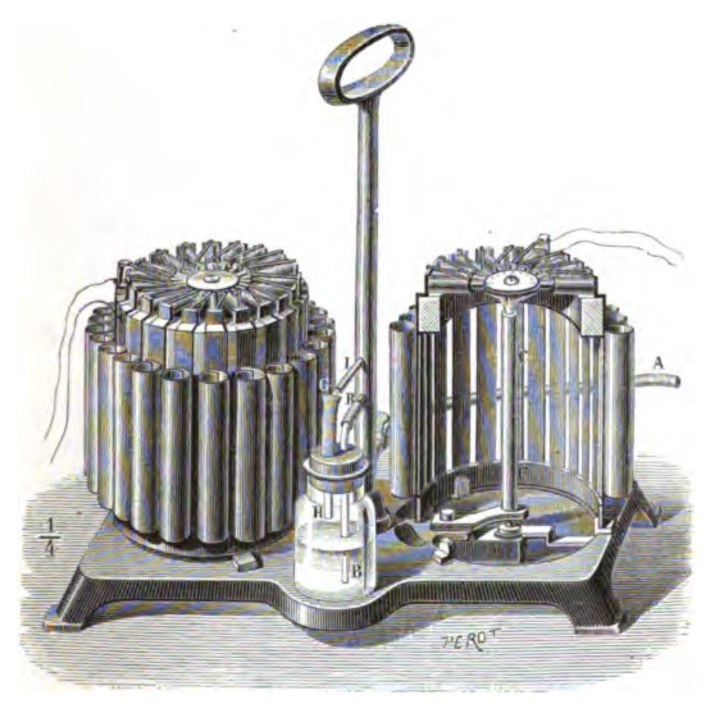


Fig. 11. — Pile thermo-électrique de Noë.

est très répandu en Autriche et en Allemagne. Sous la forme représentée figure 11 elle n'exige que deux brûleurs Bunsen pour mettre en action quarante éléments, trois pour soixante

(1) Voir la description et les dessins dans le *Traité élémentaire de physique* de Ganot, 17e édition.

éléments et ainsi de suite par groupe de vingt, suivant les applications qu'on a en vue.

Les éléments dans chaque groupe sont placés horizontalement et se présentent comme les rayons d'un cercle, les soudures chaudes au centre, les soudures froides à la circonférence.

Les deux métaux employés sont du maillechort ou *argentan*, et un alliage d'antimoine et de zinc. A la soudure chaude ces métaux sont soudés ensemble sans l'intermédiaire d'aucun autre métal; les fils de maillechort pénètrent par leur extrémité dans une petite caspule de laiton qui sert de fond au moule dans lequel on coule l'autre métal. La figure 12 représente deux éléments séparés en grandeur naturelle; la petite capsule *c* reste attachée à l'élément et fait partie de l'appareil. Dans cette même capsule pénètre une petite tige de cuivre rouge *r*, dont l'extrémité se trouve également saisie dans le métal fondu et qui amène la chaleur à la soudure chaude par conductibilité.

Les extrémités de ces tiges de cuivre forment un petit cercle, saisies entre deux lames de mica et chauffées toutes à la fois par une flamme unique, un brûleur de Bunsen le plus souvent. On emploie quelquefois une lampe à esprit-de-vin.

En chauffant les soudures par conductibilité, on les ménage et on les protège contre le surchauffage qui aurait pour effet de fondre le métal et de mettre la pile hors de service. On évite la perte de chaleur par rayonnement de ces petites tiges de cuivre en les recouvrant d'un petit tube isolant *t* (fig. 15).

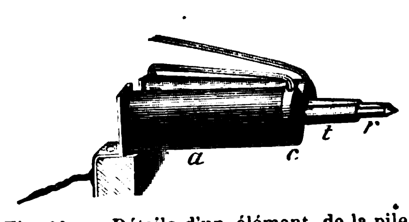


Fig. 12. — Détails d'un élément de la pile thermo-électrique de Noë.

Pour la soudure froide, le métal fusible est soudé à une plaque de cuivre à laquelle on soude les fils de maillechort de l'élément suivant ; la plaque de cuivre de forme cylindrique présente une grande surface de rayonnement favorable à son refroidissement auquel contribue d'ailleurs la circulation d'air qui se fait à l'intérieur des tubes de cuivre.

Si l'on se met dans les meilleures conditions possibles, c'est-

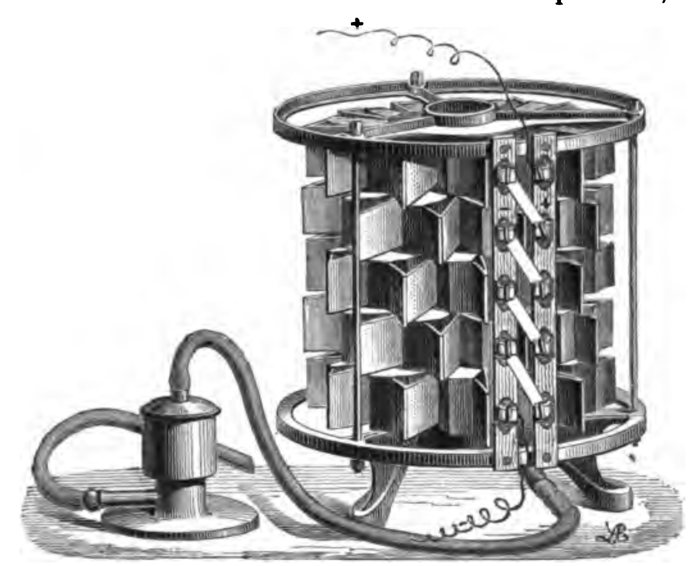


Fig. 13. — Pile thermo-électrique de M. Clamond, chauffée au gaz.

à-dire en chauffant les soudures à un degré très voisin de leur

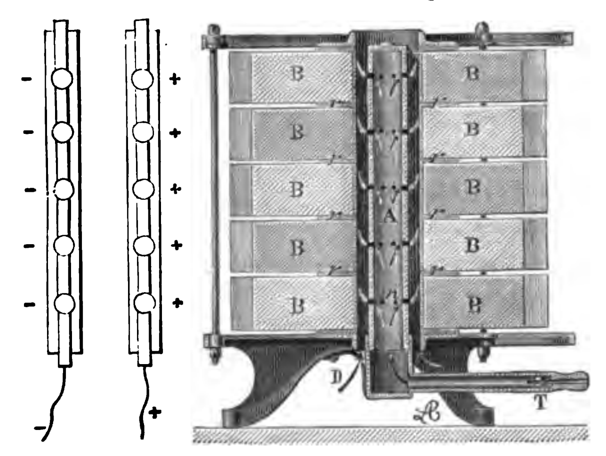


Fig. 14. — Pile thermo-électrique de M. Clamond. — Coupe suivant l'axe vertical.

T. Tubulure servant à l'arrivée du gaz. — A. Tuyau en terre réfractaire percé de trous à travers lesquels s'échappe le gaz mélangé d'air pour brûler dans l'espace annulaire extérieur. — D. Prise d'air servant à la combustion. — B, B. Barreaux thermo-électriques. — *r*, *r*. Rondelles en amiante servant à isoler les éléments du générateur.

point de fusion, tandis que les éléments Marcus ne donnent

qu'une force électro-motrice de $\frac{1}{18}$ de volt, les éléments Noë, d'après les expériences de M. Waltenhofen, ont une force électro-motrice comprise entre $\frac{1}{6}$ et $\frac{1}{10}$ de volt.

En pratique, ces chiffres ne sont pas atteints, car on ne peut pas chauffer également tous les éléments, et il faut compter sur une moyenne de $\frac{1}{16}$ de volt par élément ; dans ces conditions la résistance intérieure est égale à $\frac{1}{40}$ d'ohm.

Chaque groupe de vingt éléments a donc une force électromotrice de 1,25 volts et une résistance intérieure de 0,5 ohms.

Signalons, comme perfectionnement pratique, un régulateur de la pression du gaz qui évite un surchauffage de la pile et les accidents qui en dérivent.

Cet appareil de sûreté consiste en un flacon de verre (fig. 14) contenant de l'eau et fermé par un bouchon de liège. Deux tubes y pénètrent : le premier BB est un branchement du tube d'arrivée du gaz et va jusqu'au fond du flacon ; le second H n'arrive pas jusqu'au niveau de l'eau, il sert à évacuer le gaz qui peut se dégager dans le flacon et l'amène devant un autre petit branchement terminé par un bec de gaz I, constamment allumé. Si la pression pour laquelle l'appareil est réglé est dépassée, le gaz sort en bulles dans le flacon, traverse l'eau, sort en G et s'enflamme pour ne pas produire d'accidents ou répandre une mauvaise odeur.

Le flacon fonctionne donc comme une véritable soupape de sûreté. Il suffit de vingt éléments pour décomposer l'eau et de quarante pour charger une pile secondaire de M. Gaston Planté et faire fonctionner une bobine d'induction.

Il suffit de deux minutes pour que la pile fournisse le courant, et l'on peut arrêter le fonctionnement dès qu'on n'a plus besoin d'électricité. La pile ne s'altère pas avec le temps comme les autres piles décrites jusqu'ici, dans lesquelles le chauffage continu produirait une augmentation considérable de la résistance intérieure et par suite un affaiblissement correspondant dans l'intensité du courant dans le circuit extérieur.

Pile Mure et Clamond. — La première pile construite par

M. *Clamond*, en collaboration avec M. *Mure*, fut présentée à l'Institut par Becquerel le 31 mai 1860. Elle était formée de galène et de lames de plomb. Par l'usage, cette pile diminuait d'intensité, par suite de l'augmentation de résistance intérieure provenant de l'oxydation des contacts des lames de fer avec le barreau cristallisé sous l'influence de la chaleur, et, en second lieu, de la fendillation du barreau et de la séparation de ses différentes parties suivant des plans perpendiculaires à sa longueur.

Pile Clamond. — Le 20 avril 1874, M. Jamin a présenté à l'Académie des sciences une nouvelle pile de M. Clamond, chauffée au gaz, dans laquelle ces inconvénients sont évités. M. Clamond a adopté, pour la confection de ses couples, l'alliage de zinc et d'antimoine de Marcus, qui est bon conducteur de l'électricité et qui rend la fabrication par coulage beaucoup plus facile. L'armature est formée de lames de fer de préférence au cuivre et à l'argentan, parce que le fer résiste très bien, tandis que ces métaux, attaqués et dissous par l'alliage, sont mis rapidement hors de service. Les barreaux sont assemblés en couronnes et accouplés en tension.

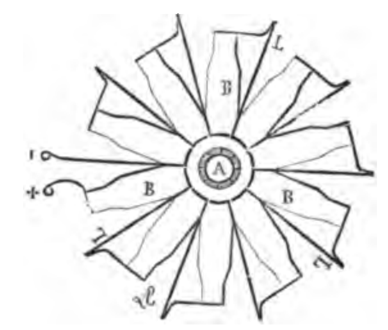


Fig. 15. — Pile thermo-électrique de M. Clamond.

Vue en plan des barreaux assemblés et de leurs armatures. — B, B. Barreaux thermo-électriques— L, L. Lames formant armatures.

Ces couronnes superposées, de dix éléments chacune, sont séparées par des rondelles d'amiante. Le tout forme un cylindre luté à l'intérieur par de l'amiante (fig. 14) et chauffé au gaz à l'aide d'un tuyau réfractaire percé de trous. Le gaz, mêlé à l'air, sort de ce tuyau et vient brûler dans l'espace annulaire compris entre le tube et les barreaux. Les extrémités des couronnes viennent aboutir à des pinces en cuivre fixées sur deux planchettes, ce qui permet l'accouplement des couronnes de dix éléments en tension ou en quantité. On règle la dépense de gaz par un rhéo-

mètre Giroud. Les figures 13, 14 et 15 représentent la vue extérieure, la coupe longitudinale et le plan d'une couronne de la pile Clamond ; les légendes qui accompagnent la coupe et le plan suffisent pour en faire comprendre les dispositions. Cet appareil de cinquante éléments dépense 0 fr. 05 de gaz à l'heure et peut déposer 20 grammes de cuivre à l'heure. Il est employé par l'imprimerie de la Banque de France et les ateliers d'héliogravure de MM. Goupil et C[ie] à Asnières.

Pile Clamond, chauffée au coke. — Depuis 1874 M. Clamond a continué ses études sur les piles thermo-électriques, et, le 5 mai 1879, M. le comte du Moncel a présenté à l'Académie des sciences une nouvelle pile beaucoup plus puissante que ses devancières avec laquelle on a pu obtenir de la lumière électrique.

La figure 16 représente une vue d'ensemble de la nouvelle pile de M. Clamond ; les figures 17 et 18 donnent les détails principaux.

L'ensemble de l'appareil comprend trois parties :

1° Le foyer et le collecteur dont le but est de chauffer les soudures intérieures de la pile ;

2° La pile proprement dite, disposée en couronne ;

3° Le diffuseur qui a pour but de refroidir les soudures extérieures.

Foyer et collecteur. — Le chauffage de la pile se fait à la houille ou au coke. Les gaz de la combustion, en sortant du foyer C (fig. 16), traversent un conduit cylindrique en fonte C, redescendent en D par une série de carneaux disposés en couronne, remontent en E dans une seconde série de carneaux et s'échappent finalement dans l'atmosphère par une cheminée A. Le chauffage des éléments n'est donc pas *direct;* il n'y a même aucun contact entre les éléments et les gaz chauds, mais ces gaz chauffent la masse de fonte dans laquelle ils circulent, cette masse agit comme *collecteur* de chaleur, la communique aux éléments en la répartissant d'une manière plus uniforme.

Pile. — La pile se compose d'une série de *chaînes* disposées en couronne autour du collecteur et chauffées par leur face inté-

rieure. La pile de 3000 couples comprend 60 chaînes de 50 couples chacune.

Chaque couple se compose d'un barreau thermo-électrique de 3 centimètres de longueur, autant de largeur et 3 centimètres d'épaisseur. Ces petits prismes sont formés d'un alliage de bismuth et d'antimoine et reliés entre eux par des armatures en

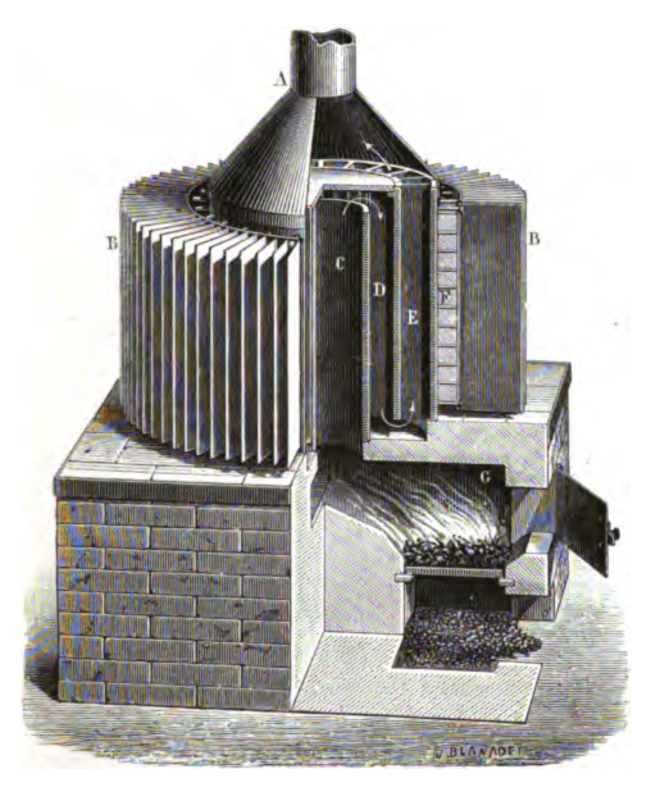


Fig. 16. — Pile thermo-électrique de M. Clamond. Chauffage au coke.

fer (fig 18). Ces armatures sont découpées dans des feuilles de tôle mince et tordues à leurs extrémités P et P′ en tire-bouchon. Pour fabriquer une chaîne, on dispose dans un moule spécial une série de ces armatures après avoir entouré la partie pleine G d'un carton d'amiante, et on coule l'alliage dans le moule. Les cinquante éléments sont ainsi fabriqués d'un

seul coup, les parties P et P′ de chaque armature sont reliées à deux couples successifs par une *soudure autogène*. Les chaînes sont disposées verticalement et en couronne entre le collecteur A et le diffuseur B (fig. 17) en disposant entre eux et les chaînes des lames minces de mica qui les isolent électriquement, tout en se laissant traverser par la chaleur. Dans la pile de 6000 éléments, on établit deux groupes de 3000 éléments chacun disposés en tension. Pour une température des soudures chaudes de 360° et une température de 80° pour les soudures froides, les 3000 éléments représentent, d'après les expériences de M. G. Cabanellas, une force électro-motrice de 109 volts et une résistance intérieure de 15,5 ohms.

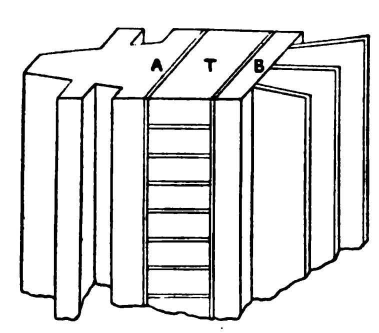


Fig. 17. — Pile Clamond. A, collecteur. — T, chaîne thermo-électrique. — B, diffuseur.

Diffuseur. — Le but du diffuseur est de maintenir les soudures extérieures des chaînes à une température aussi basse que possible, température qui, en pratique, ne dépasse pas 80°. Il se compose d'une série de lames de cuivre placées tout autour de la pile et qui augmentent la surface de refroidissement. Ces lames sont représentées en B (fig. 17). La pile à coke de M. Clamond est donc un véritable *calorifère électrique*, et comme tel pourrait être établie dans tous les cas où un calorifère trouve son emploi. Le modèle de 6000 couples brûle de 9 à 10 kilogrammes de coke par heure. En disposant deux circuits de 3000 éléments chacun, on peut alimenter deux lampes Serrin qui fournissent une lumière de 30 à 50 becs chacune.

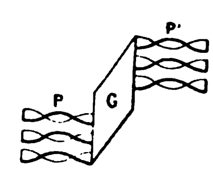


Fig. 18. — Armature d'un élément de la pile Clamond.

Bien que jusqu'ici le rendement des piles thermo-électriques, c'est-à-dire le rapport de la chaleur dépensée à la chaleur transformée en électricité, soit très faible, ces appareils sont intéres-

sants, car ils transforment *directement* la chaleur en électricité, tandis que les machines électro-dynamiques, que nous allons examiner maintenant, passent par des intermédiaires complexes.

Signalons une application de la pile thermo-électrique à la mesure des forces électro-motrices faite par Gaugain à l'administration des lignes télégraphiques. *Gaugain* employait des couples bismuth-cuivre disposés en fer-à-cheval les uns à côté des autres sur une traverse de bois qui permet de les soulever ou de les plonger d'un seul coup dans des bains, dont l'un est de l'eau distillée à 0° et l'autre de la paraffine chauffée à 100°. La pile ainsi constituée a une force électro-motrice *constante*, elle forme donc une excellente *pile-étalon*. Sa force électro-motrice est de $\frac{1}{182}$ de volt; en disposant 182 éléments *en tension*, et en maintenant les soudures exactement aux températures de 0° et 100°, on aura une pile dont la force électro-motrice sera de un *volt* d'une manière exacte.

Les applications des piles thermo-électriques sont restées malheureusement jusqu'ici, malgré d'encourageantes expériences, dans le domaine de la science pure, sauf les quelques applications faites par la Banque de France et la maison Goupil à des dépôts électro-chimiques. Contre notre espérance, l'Exposition d'électricité n'a montré aucun progrès de ce côté; aussi n'y a-t-il eu aucune modification à apporter, à ce point de vue, à ce que nous disions dans notre première édition.

CHAPITRE III

LES MACHINES ÉLECTRO-DYNAMIQUES

La transformation du travail en électricité est le moyen le plus compliqué pour produire un courant électrique ; il est cependant jusqu'ici le plus économique et de beaucoup le plus employé dans toutes les applications qui exigent des courants puissants. Le développement immense qu'a pris l'usage des machines ne date que de quelques années, bien que la découverte du principe fondamental de *toutes* les machines ait été faite en 1830 par *Faraday*.

Elle avait d'ailleurs été préparée par l'expérience d'OErsted montrant, dès 1820, l'action d'un courant sur l'aiguille aimantée et par Arago quelque temps après, qui découvrit l'aimantation produite par un courant. Puisque l'on connaissait dès 1820 l'action des courants sur les aimants et leur action aimantante sur le fer doux, en raisonnant par le système des réciproques, on aurait pu déduire *à priori* de ce phénomène qu'un aimant permanent, réagissant sur un circuit fermé disposé en spirale, devait déterminer dans ce circuit un courant électrique ; mais ce ne fut qu'en 1830, dit M. le comte du Moncel dans son ouvrage sur l'*Éclairage électrique*, que l'illustre physicien anglais Faraday constata le premier ce phénomène et en détermina les différents caractères.

Nous n'avons pas à faire ici la théorie des courants d'induction produits par l'approche ou l'éloignement d'un aimant ou d'un

courant ; tous les traités de physique donnent les lois de ces courants, lois formulées par Lenz et Matteucci.

Toutes les machines électro-dynamiques sont fondées sur la découverte de Faraday et les lois de Lenz et de Matteucci appliquées de façon à recueillir le mieux possible les effets des courants d'induction.

Classification des machines électro-dynamiques. — Il n'existe pas de nom spécial pour désigner l'ensemble des machines qui transforment le travail en électricité; nous avons choisi celui de *machines électro-dynamiques*, qu'il ne faut pas confondre avec dynamo-électriques, comme nous le verrons tout à l'heure, parce que ce mot comprend à la fois la cause qui est le travail, la puissance (δύναμις), et l'effet qui est l'électricité engendrée par ce travail.

Dans toute machine électro-dynamique — le mot *électro-dynamique* défini comme nous venons de le faire — on trouve toujours deux parties fondamentales, nécessaires, indispensables, l'*inducteur* et l'*induit*. En faisant mouvoir l'inducteur devant l'induit ou, le plus souvent, l'induit devant l'inducteur, il se développe dans le fil de l'induit des courants électriques dont la nature, l'intensité et le sens sont définis par les lois de Lenz. Ces lois montrent que, pour obtenir des courants puissants, il faut faire mouvoir les induits avec une grande vitesse devant des inducteurs puissants.

Toute disposition mécanique qui permet d'obtenir ce résultat est une machine électro-dynamique.

Le rôle de l'inducteur est de créer autour de lui un espace dans un état spécial de mouvement : on donne à cet espace le nom de *champ magnétique*.

Ce champ magnétique peut être produit de deux façons très différentes qui constituent la première division à établir entre les machines électro-dynamiques.

Si le champ magnétique de l'inducteur dans lequel se meut l'induit est produit par un *aimant fixe* et permanent, la machine est dite *magnéto-électrique*.

Si le champ magnétique est constitué par un *électro-aimant*, ce qui augmente son intensité, les électro-aimants étant à poids égal, beaucoup plus puissants que les aimants permanents, la machine est dite *dynamo-électrique*. Ce nom assez impropre, puisqu'il ne rappelle que très indirectement le moyen par lequel le champ magnétique est constitué, est cependant universellement consacré par l'usage, et nous le conserverons.

La division ci-dessus repose sur la nature de l'inducteur ; il en existe une seconde, plus importante encore peut-être, fondée sur la nature des courants recueillis hors de la machine sur le circuit extérieur.

D'après les lois de Lenz, lorsqu'un élément de spire d'un induit traverse un champ magnétique, le courant engendré dans cet élément circule tantôt dans un sens, et tantôt dans un autre ; il est *alternatif*.

Lorsque la machine recueille directement les courants alternatifs ainsi développés sans les redresser, c'est-à-dire sans les faire passer toujours dans le même sens dans le circuit extérieur, elle est *à courants alternatifs*.

Si, au contraire, la machine redresse les courants alternatifs et les fait circuler toujours dans le même sens, dans le circuit extérieur, elle est à *courants continus*.

Nous étudierons seulement les types les plus employés de ces différentes classes de machines :

A. Machines a courants continus.....	*a. Magnéto-électriques.* *b. Dynamo-électriques.*
B. Machines a courants alternatifs..	*c. Magnéto-électriques.* *d. Dynamo-électriques.*

A. — Machines a courants continus.

a. — Machines magnéto-électriques.

Bien que la découverte de l'induction remonte à Faraday

en 1830, ce fut seulement le 31 janvier 1832 que Nobili obtint pour la première fois, à Florence, l'étincelle produite par un effet d'induction, mais il n'y avait pas encore de courant proprement dit.

La première machine fournissant un courant fut construite par Hippolyte Pixii, de Paris, et présentée à l'Académie des sciences le 3 septembre 1832.

Machines de Pixii. — Nous ne citons cette machine historique que pour signaler une particularité assez curieuse et que nous ne retrouverons dans aucune autre machine magnéto-électrique. L'appareil bien connu se compose de deux bobines et d'un aimant en fer à cheval dont les pôles sont placés en face des bobines, et tournent de façon à venir présenter successivement leurs deux pôles devant les extrémités des bobines.

Au lieu de faire mouvoir l'induit dans le champ magnétique, on fait mouvoir le champ magnétique devant l'induit, mais cette disposition ne change rien au principe. Les courants ainsi développés sont alternatifs, mais, à l'aide d'un *commutateur* imaginé par Clarke, on redressa les courants et la machine de Pixii fut la première machine à courants continus ou plutôt redressés.

Machine de Saxton. — La machine de Saxton est disposée comme la machine de Pixii, c'est-à-dire que l'aimant et les bobines sont placés bout à bout, mais les aimants sont fixes et les bobines mobiles. Il en résulte que, la masse à mettre en mouvement étant moins grande, la machine peut être plus légère à puissance égale.

Machine de Clarke. — En 1834, Clarke construisit une machine dans laquelle l'aimant était vertical et les bobines horizontales; elles se présentaient donc à l'inducteur, non plus par les bouts, mais par les faces aplaties de l'aimant en fer à cheval. C'est sous cette forme que les machines magnéto-électriques se sont répandues dans tous les cabinets de physique et qu'aujourd'hui encore on les emploie en médecine.

Machine de Page. — En 1835, Page, en Amérique, fit une machine dans laquelle l'aimant et les bobines étaient fixes,

celles-ci entourant celui-là. Le courant était engendré par le mouvement rapide d'une armature en fer doux tournant devant les extrémités de l'aimant, et produisant des courants alternatifs par surexcitations et affaiblissements successifs du champ magnétique; ces courants étaient ensuite redressés à la manière ordinaire par un commutateur de Clarke.

Toutes ces machines et plusieurs autres basées sur les mêmes principes n'étaient encore que des appareils de faible puissance dont les applications restaient fort restreintes. En 1840, *Nollet*, alors professeur de physique à l'école militaire de Bruxelles, se proposa de construire une machine de Clarke dans de grandes proportions et créa la machine connue aujourd'hui sous le nom de *Machine de l'Alliance*.

Les appareils de Nollet ne purent donner de bons résultats que lorsque *Masson*, professeur de l'École centrale, suggéra à *Van Malderen*, ingénieur de la compagnie l'*Alliance*, l'idée de ne pas redresser inutilement les courants et de transformer la machine à courants continus en machine à courants alternatifs; nous y reviendrons plus tard lorsque nous parlerons de ces machines.

Bobine de Siemens. — En 1854, M. *W. Siemens*, de Berlin, fit faire un grand progrès à la question en imaginant la bobine qui porte son nom et que nous retrouverons dans un grand nombre d'appareils, tels que ceux de Wilde, Ladd, etc.

La bobine de Siemens est un cylindre de fer doux portant deux rainures longitudinales parallèles à son axe qui lui donnent, en section transversale, la forme d'un double T. Ces rainures servent à loger un fil de cuivre isolé, roulé un grand nombre de fois sur lui-même et dont les extrémités viennent se fixer aux deux moitiés d'un commutateur redresseur de courants, comme dans les machines de Clarke. En faisant tourner rapidement cette bobine entre les pôles d'un aimant, il se développe dans le fil des courants d'induction dus aux polarités alternativement inverses que prennent les deux pôles allongés de la bobine, ces courants sont ensuite redressés et recueillis à la manière ordinaire. En 1879, M. *Marcel Deprez* a modifié la machine de

Siemens en disposant l'axe de la bobine parallèlement aux branches de l'aimant. Nous parlerons de cette modification à propos des moteurs électriques, car toutes les machines électro-dynamiques à courant continu sont *réversibles*, c'est-à-dire que, si elles développent de l'électricité en dépensant du travail, elles peuvent, en leur faisant dépenser de l'électricité fournie par une source quelconque, développer du travail.

Pour clore la série de machines magnéto-électriques à courants continus, nous aurions encore à parler des machines de Gramme, modèle de laboratoire, mais nous sommes obligé de réserver sa description.

Il se place, en effet, entre la bobine de Siemens de 1854 et l'anneau de Gramme qui date de 1870, toute une série de principes nouveaux que nous devons exposer avant de parler d'une invention qui a fait faire des progrès si rapides à la production mécanique de l'électricité.

b. — Machines dynamo-électriques à courants continus.

Nous savons que le courant électrique est engendré, dans les machines électro-dynamiques, en faisant mouvoir rapidement le fil induit des bobines dans un champ magnétique puissant formé par l'inducteur. La puissance des courants produits dépend en grande partie de la puissance du champ magnétique.

Machine de Wilde. — Comme, à poids égal, un électro-aimant a une puissance au moins vingt-cinq fois plus grande qu'un aimant en acier, M. *Wilde* pensa qu'en employant des électro-aimants au lieu d'aimants pour inducteurs, on augmenterait ainsi beaucoup l'intensité du champ magnétique et, par suite, l'intensité des courants produits. C'est là le principe du *dynamo*, ainsi nommé, assez improprement d'ailleurs, par opposition au *magnéto*, dans lequel le champ magnétique est formé par des aimants, au lieu d'*électro-aimants*.

La machine de Wilde, qui figura à l'Exposition universelle de 1867, se composait en réalité de deux machines superposées. La

première était une machine magnéto-électrique de Siemens qui envoyait le courant dans deux électro-aimants de grande dimension servant d'inducteurs à une seconde bobine de Siemens constituant le circuit extérieur.

La petite machine de Wilde sert à alimenter, à *exciter* les inducteurs de la seconde bobine, on lui donne pour cette raison le nom de *machine excitatrice.* On la nomme aussi quelquefois *induisante* ou *amorçante.*

Un des inconvénients de la machine de Wilde est la grande vitesse qu'il faut donner aux bobines — 2000 à 2500 tours par minute —; il en résulte un échauffement considérable qu'on devait combattre par une circulation d'eau froide disposée entre les pièces polaires de l'électro-aimant inducteur de la bobine du circuit extérieur.

Machine de Ladd. — La machine de Ladd est la première application d'un nouveau principe découvert en même temps par Wheatstone et Siemens, et présenté à la Société royale de Londres *le même jour*, le 14 février 1867.

Ce principe est celui de l'accroissement successif de puissance d'un système électro-magnétique sous l'influence des courants d'induction qu'il développe. Il suffit pour cela d'une trace de magnétisme provenant, soit de l'action momentanée d'une pile, soit de l'action magnétique du globe terrestre, soit du magnétisme rémanent pour produire l'action amorçante et l'accroissement de magnétisme jusqu'à un certain maximum dépendant de la vitesse de rotation de la bobine, des résistances du circuit et du point de saturation magnétique de ses inducteurs.

Dans la machine de Ladd, construite sur ce principe, on retrouve les deux bobines de Siemens employées par Wilde, seulement l'aimant permanent est supprimé.

L'électro-aimant est formé de deux larges plaques de fer entourées de fil et formant ainsi deux électro-aimants droits dont les pôles en regard sont de noms contraires; les deux bobines de Siemens sont disposées transversalement aux deux extrémités de ces électro-aimants. L'une d'elles, la plus petite, envoie le courant

qu'elle engendre dans les électro-aimants pour entretenir son magnétisme, la seconde est utilisée à l'alimentation du circuit extérieur.

Il suffit d'une trace de magnétisme rémanent dans les plaques des électro-aimants pour produire, par suite des surexcitations successives, un courant très intense qui donne aux électro-aimants une grande puissance et développe ainsi un champ magnétique d'une très grande intensité. On peut d'ailleurs régler cette puissance du champ magnétique, en modifiant la vitesse de rotation.

L'électricité produite par cette machine, eu égard à ses faibles dimensions, étonna beaucoup les visiteurs de l'Exposition de 1867. Aujourd'hui ces résultats sont dépassés de beaucoup par les machines de Gramme et de Siemens.

La grande vitesse donnée aux bobines dégageait une chaleur considérable dans la machine, chaleur due aux changements rapides de magnétisme du fer doux. D'autre part, l'emploi de deux bobines distinctes compliquait la transmission de mouvement, car il fallait deux poulies et deux courroies.

Rukmhorff simplifia la machine de Ladd en disposant les deux bobines sur le même axe à angle droit; l'électro-aimant inducteur est en forme de fer à cheval, on n'a alors qu'un seul axe à mettre en mouvement.

Dans les machines construites par M. *Gaiffe*, il n'y a même qu'une seule bobine sur laquelle on roule deux fils complètement distincts dont l'un sert à alimenter les inducteurs et l'autre correspond au circuit extérieur.

Les modèles de MM. Gaiffe et Ruhmkorff sont de petites dimensions et ne constituent que des appareils d'expériences et de laboratoire. Quant aux machines originales de Wilde et de Ladd, capables de fournir des courants assez puissants pour produire la lumière électrique, il n'en a pas été construit d'autres depuis les nouvelles machines de Gramme, Siemens, Lontin, etc.

Modes d'excitation des inducteurs dans les machines dynamo-électriques. — Quelle que soit la forme de l'induit,

bobines de Clarke, bobine de Siemens, anneau de Gramme, etc., on peut diviser les machines dynamo-électriques en trois classes qui se distinguent par le mode d'excitation des électro-aimants inducteurs.

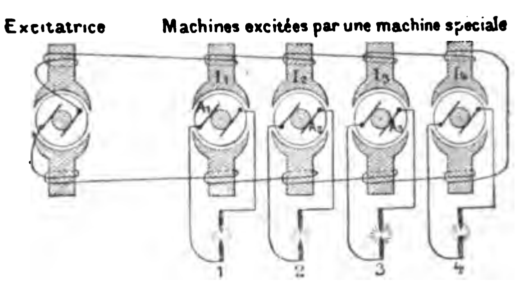


Fig. 19. — Exemple de machines excitées par une excitatrice séparée. L'excitatrice appartient elle-même à la deuxième classe.

1re *classe*. — Dans la machine de Ladd, qui est le type de cette classe, les inducteurs sont excités par un circuit distinct parfaitement séparé, alimenté par une machine spéciale. Souvent même, la même excitation sert pour plusieurs machines distinctes : la figure 19 ci-dessus représente une disposition dans laquelle la machine excitatrice s'excite elle-même ainsi que les inducteurs de quatre autres machines alimentant quatre arcs voltaïques distincts.

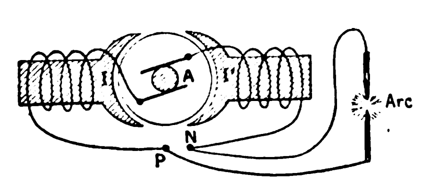


Fig. 20. — Diagramme du montage ordinaire d'une machine dynamo-électrique alimentant un arc voltaïque (2e classe).

2e *classe*. — Les électro-aimants formant le champ magnétique sont disposés *dans le même circuit* que l'induit et le circuit extérieur. C'est la disposition imaginée par Wheatstone et Siemens en 1867 et appliquée aujourd'hui à un grand nombre de machines dynamo-électriques.

La figure 20 montre cette disposition spéciale. Le courant continu produit par l'induit A traverse les deux inducteurs I et I', en même temps que l'arc qu'il alimente. Le champ ma-

gnétique dépend donc de la puissance du courant qui traverse les inducteurs, c'est-à-dire du courant général.

3[e] *classe*. — La disposition qui caractérise les machines de cette classe a été aussi imaginée par Wheatstone dès 1867, mais elle n'a été reprise qu'en 1880 par M. Siemens. Cette disposition consiste à disposer les inducteurs *en dérivation* sur le circuit, au lieu de les placer dans le même circuit, à la condition de disposer sur ces inducteurs un fil assez long et assez résistant. Il en résulte pour la machine des conditions de fonctionnement beaucoup plus favorables à la régularité du courant (1). La machine Édison dont nous parlerons plus loin en offre un exemple.

Principe de la machine de Gramme. — Depuis la dé-

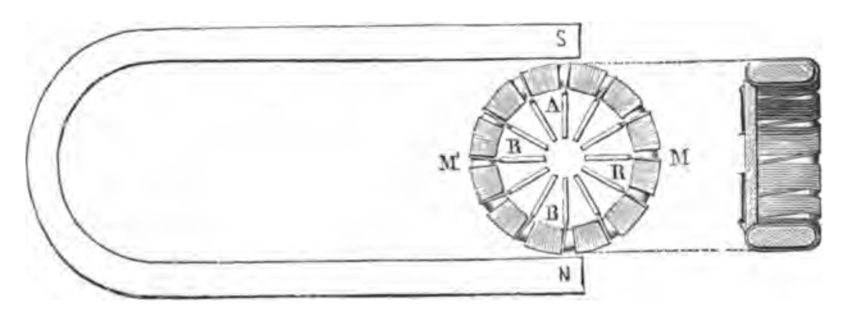


Fig. 21. — Principe de l'anneau de Gramme.

couverte de Siemens et Wheatstone, on n'a pas à signaler de plus grand progrès dans la production mécanique de l'électricité que l'invention faite en 1870, par un ancien ouvrier de la Compagnie *l'Alliance*. C'est grâce à la machine de M. *Gramme* (Zénobe-Théophile) que les applications de l'électricité à l'éclairage, à la galvanoplastie et au transport de force motrice ont reçu depuis quelques années de si grands développements.

L'induit mobile de Gramme présente l'aspect d'un *anneau* tournant autour de son centre et dans son plan ; on peut le concevoir comme formé par un électro-aimant droit qu'on aurait

(1) Voir, pour plus de détails, *la Lumière électrique* du 15 avril 1880, p. 181.

courbé en cercle et qu'on aurait soudé par ses extrémités, le fer avec le fer, le fil avec le fil.

Remarquons que l'idée d'employer un anneau pour constituer l'induit mobile n'est pas nouvelle. On pourrait la faire remonter à Page qui, dès 1852, construisit un *moteur* fondé sur ce principe. En 1861, M. *Pacinotti* construisit aussi un moteur dont le principe était identique à celui de l'anneau de Gramme (1), et dont il publiait une description complète en 1864, dans *Il nuovo cimento*. La machine Pacinotti a figuré à l'Exposition de 1881, et a valu à son inventeur un diplôme d'honneur.

Sa priorité et son identité de principe avec la machine Gramme ne peut plus être contestée aujourd'hui, mais on peut regretter que M. Pacinotti n'ait pas eu, comme M. Gramme, conscience de l'importance de sa découverte, et n'ait pas fait tous ses efforts pour la rendre pratique et industrielle.

La machine de Gramme, malgré la priorité de M. Pacinotti, a donc une valeur réelle et absolument personnelle, justifiée d'ailleurs par son succès dans les applications que nous examinerons au cours de ce volume.

Pour comprendre l'action de la machine de Gramme, reportons-nous à l'expérience la plus simple de l'induction.

Considérons un barreau aimanté d'un mètre de long et une spire de fil conducteur en mouvement réciproque ; si on approche la spire du barreau, il s'y développe un courant d'induction.

Supposons que le barreau pénètre dans la spire par une série de mouvements successifs d'égale étendue. On observe qu'à chacun de ces mouvements correspond un courant d'induction ; tous ces courants sont de même sens jusqu'à ce que la spire arrive en face de la ligne neutre ; ils changent de sens si l'on continue le mouvement dans le même sens au delà du point neutre. Que se passe-t-il dans l'anneau de Gramme ? L'anneau de fer est aimanté par influence de l'aimant, et le magnétisme s'y trouve distribué de la manière suivante :

(1) Voir l'*Électricien* du 15 novembre 1881.

Les pôles sont en A et A′ (fig. 24) et les parties neutres en M et M′.

En faisant tourner l'anneau, cette distribution du magnétisme ne change pas, les pôles sont fixes dans l'espace, bien que l'anneau se déplace, la force coercitive du fer doux qui le constitue étant nulle ou négligeable.

Tout se passe donc comme si le fer était immobile et si les spires de fil seules se mouvaient sur un barreau aimanté.

Dans chacune des bobines élémentaires il se développe donc un courant qui, partant d'un des pôles A, reste direct jusqu'à la ligne neutre M, prend le sens inverse de M jusqu'en B, garde ce sens de B à la ligne neutre M′, et redevient direct de M′ au pôle A. Le courant reste donc de même sens d'un point neutre à l'autre.

Toutes les bobines qui, à un moment donné, sont dans le demi-cercle supérieur, sont toutes à la fois parcourues par des courants de sens direct qui s'ajoutent *en tension ;* les bobines du demi-cercle inférieur sont parcourues par des courants de sens inverse, associés aussi en tension. Il y a donc équilibre, et on peut comparer le système à deux séries de piles égales en nombre et en puissance associées en opposition. En mettant les deux extrémités d'un circuit extérieur en communication avec les pôles opposés communs des deux piles, ces piles sont associées en quantité : de même en établissant des *collecteurs* sur les points neutres de l'anneau, on peut recueillir les courants développés dans l'anneau. Ces collecteurs sont formés de pinceaux ou balais de cuivre qui frottent sur une série de pièces rayonnantes R isolées les unes des autres et rattachées chacune au bout sortant d'une bobine et au bout entrant de la voisine. Ces courants sont donc recueillis sur les pièces R comme ils le seraient sur la soudure même d'une bobine à l'autre.

Dans la forme pratique, les pièces R sont rapprochées en un cylindre de petit diamètre, mais toujours isolées les unes des autres. Cela ne change rien au principe.

Entre certaines limites, la force électro-motrice augmente

proportionnellement à la vitesse; le sens du courant change avec le sens de la rotation. Le courant est continu, car le circuit n'est jamais rompu et les frotteurs ou balais commencent à toucher l'un des rayons avant d'avoir abandonné le précédent.

A cause de leur flexibilité et du grand nombre de petits fils de cuivre qui les composent, ils touchent toujours par quelques-unes de leurs parties, sinon par toute leur largeur.

En changeant la grosseur du fil des bobines, on peut leur faire produire à volonté de la tension ou de la quantité ; le fil fin augmente la résistance intérieure et la tension du courant, le fil gros diminue cette résistance et augmente la quantité aux dépens de la tension. Tension et quantité sont donc les deux éléments d'une circulation électrique comme la pression et le volume débité sont les éléments de la circulation des fluides en hydraulique. L'énergie dépensée dans chaque cas est le produit de deux facteurs, produit qui peut être constant pour des facteurs variables à l'infini.

Machines de Gramme à aimants Jamin. — M. Gramme a construit un assez grand nombre de modèles de machines fondées sur le principe de l'anneau et du collecteur. Celle que nous avons prise comme type, pour expliquer la production des courants et la manière de les recueillir, est magnéto-électrique.

La figure 22 représente le modèle de machine magnéto-électrique à laquelle M. Gramme a appliqué fort heureusement les aimants feuilletés de M. Jamin. Des expériences nombreuses et précises ont prouvé que les aimants feuilletés, à poids égal, sont beaucoup plus puissants que les aimants ordinaires, à la condition de munir leurs extrémités (fig. 22 et 23) de pièces de fer doux qui partagent leur magnétisme avec les extrémités de l'aimant.

Avant l'adjonction des armatures de fer doux, on ne pouvait superposer que cinq ou six lames utilement ; avec les armatures en fer doux, on peut superposer jusqu'à vingt lames. Ajoutons à la grande puissance des aimants Jamin, l'avantage de pré-

senter une grande facilité pour le montage, le démontage et le remplacement des lames.

La machine magnéto-électrique à aimants Jamin est maintenant très employée dans les laboratoires. On la met en mouve-



Fig. 22. — Machine Gramme à aimant Jamin. Petit modèle de laboratoire.

Fig. 23. — Aimant Jamin.

ment très aisément à la pédale ou à la manivelle ; elle rend de très grands services pour les expériences de courte durée, le chargement des piles secondaires, etc., etc.

Machines dynamo-électriques de Gramme. — Quelle que soit la puissance du champ magnétique développé par un aimant Jamin, elle est loin d'être équivalente à celle d'un électro-aimant, aussi préfère-t-on en général, dans l'industrie, les machines *dynamo* aux machines *magnéto* qui, à poids ou à prix égal, transforment en électricité un travail beaucoup plus considérable.

C'est pour ces raisons que M. Gramme, après avoir construit les machines que nous venons d'examiner, et qui sont toujours

restées des appareils peu puissants, appliqua à son anneau le principe découvert par Wheatstone et Siemens.

La première machine dynamo-électrique construite par l'inventeur date de 1872 ; elle fut appliquée à la galvanoplastie dans les ateliers de MM. Christofle et Cie. Elle comprenait quatre barres d'électro-aimants et deux bobines.

La première machine de Gramme étudiée pour la lumière électrique avait six barres d'électro-aimants et trois bobines.

On retrouve dans ces deux premières machines le principe appliqué par Ladd à son générateur électrique. Un des anneaux servait à exciter les inducteurs, les deux autres fournissaient le courant extérieur et pouvaient être groupés, suivant les applications, en tension ou en quantité.

Dans un autre modèle plus petit, il n'y a plus que deux anneaux, dont l'un sert à produire le champ magnétique et l'autre à alimenter le circuit extérieur.

Dans un autre modèle, il n'y a qu'un seul anneau formé de 120 bobines partielles, mais raccordées à deux collecteurs disposés de chaque côté de l'anneau, de façon que toutes les bobines de rang pair, par exemple, correspondent au collecteur de droite, et toutes les bobines de rang impair au collecteur de gauche ; il en résulte que la machine fonctionne comme s'il y avait deux anneaux distincts qu'on peut ensuite grouper en tension ou en quantité suivant les besoins.

Dans cette machine, les inducteurs sont disposés dans le même circuit que les bobines, comme l'indiquaient Wheatstone et Siemens en 1867, mais, d'après M. Fontaine, le brevet de M. Gramme relatant cette disposition serait antérieur à la communication de ces deux savants ; de simplification en simplification, l'inventeur a été amené à établir, pour l'industrie, un type à deux barres d'électro-aimants et à n'employer qu'un seul anneau central.

La machine ainsi constituée est dite *type d'atelier* ou *type A* ; elle est représentée figure 24 (p. 55). On y retrouve la bobine et les collecteurs de la machine magnéto-électrique ; les inducteurs

se composent de deux tiges en fer doux, fixées sur le bâti et portant en leur milieu, où se trouvent les pôles, deux armatures qui entou-

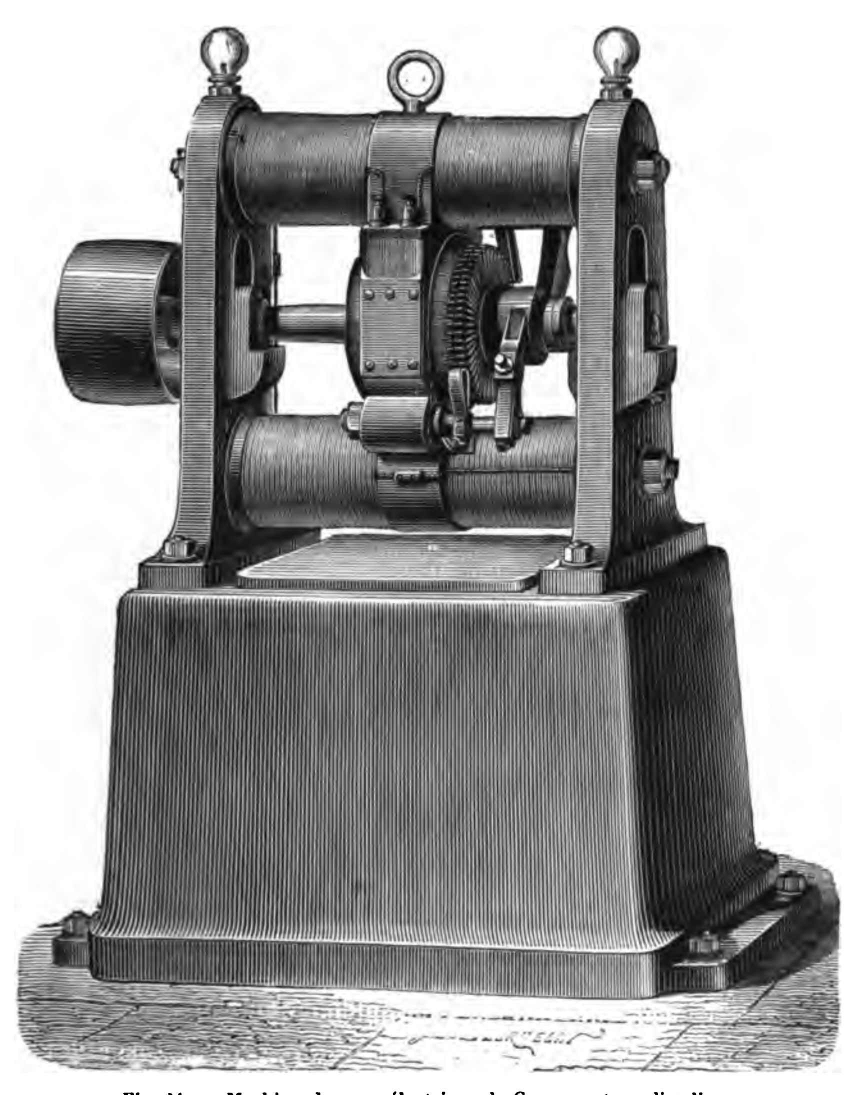


Fig. 24. — Machine dynamo-électrique de Gramme, type d'atelier.

rent l'anneau sur les trois quarts de sa circonférence pour bien répartir le champ magnétique et augmenter les effets de l'induction.

Dans les machines à galvanoplastie, où il faut de la quantité (1) et peu de tension, la garniture des électro-aimants inducteurs est formée d'une seule bande de cuivre mince, tenant toute la largeur d'une demi-barre d'électro-aimant ; la bobine est elle-même formée de fil méplat très épais, assez fort pour s'opposer aux effets de la force centrifuge.

La machine Gramme, sous sa forme actuelle, réalise toutes les conditions qu'un bon générateur électrique doit réaliser ; on pourrait seulement lui reprocher les difficultés que présente l'enroulement de l'anneau, difficultés vaincues grâce à l'habileté des constructeurs.

La machine Gramme transforme en électricité, dans certaines conditions de circuit extérieur, 85 à 90 p. 100 du travail dépensé sur l'arbre ; ce chiffre dit assez qu'il n'y a plus rien à faire dans le but d'augmenter le rendement des machines.

Les seuls perfectionnements dont elles sont susceptibles résident surtout dans la facilité de construction, de réparation, et leur diminution de poids et de prix.

Nous allons maintenant passer en revue un certain nombre d'autres machines qui, bien que basées pour la plupart sur les principes que nous venons d'exposer, présentent cependant certaines particularités intéressantes à titres très divers.

Machine Schuckert. — La seule particularité intéressante que présente cette machine est de n'être, comme le dit fort justement M. le comte du Moncel dans son livre sur l'*Éclairage électrique*, qu'une copie de l'invention de Gramme.

Dans la machine de Schuckert, l'anneau est plat et l'induction se fait par les faces latérales de l'anneau au lieu de s'effectuer sur la partie cylindrique. Le moindre inconvénient de cette machine est de rendre encore plus difficile l'enroulement du fil sur l'anneau.

Machine Niaudet. — En 1872, M. *Alfred Niaudet* combina une machine de type de Clarke munie du collecteur de Gramme.

(1) La quantité s'obtient en diminuant la résistance de la machine ainsi que celle du circuit extérieur. La formule de Ohm montre que, dans ces conditions, I peut être très grand si le dénominateur est très petit.

Cette machine est magnéto-électrique (fig. 25), mais sa description ne pouvait pas être donnée avant celle de l'anneau de Gramme sans redites inutiles. Pour comprendre le fonctionnement de cet appareil, on n'a qu'à considérer chaque bobine comme une des bobines partielles de l'anneau Gramme, car les bobines de Clarke sont toutes rattachées les unes aux autres ; le bout entrant de chacune étant lié au bout sortant de la bobine suivante. Les courants sont recueillis à l'aide de frotteurs qui

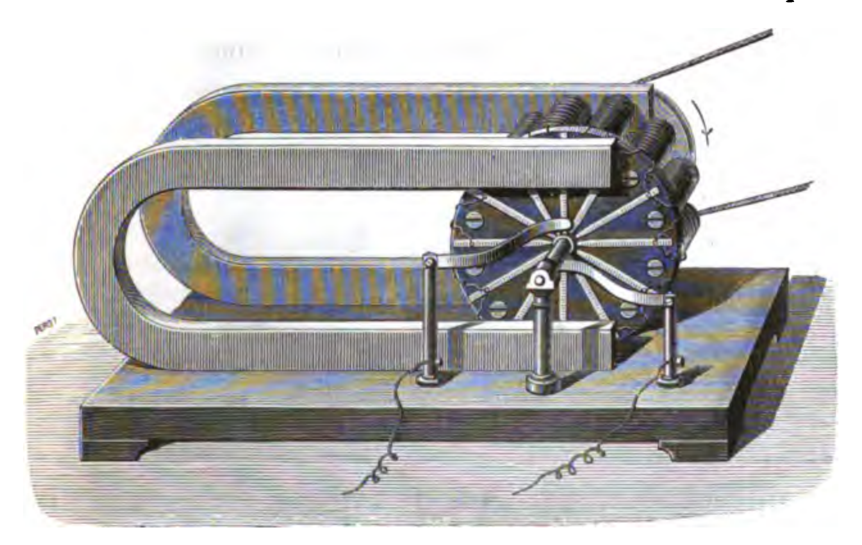


Fig. 25. — Machines à courants continus de M. Niaudet.

touchent les points de liaison des différentes bobines entre elles.

La continuité du courant résulte de ce que les ressorts collecteurs, avant de quitter une des pièces radiales, commencent déjà à toucher la pièce radiale voisine.

Les machines Gramme fournissent, à égalité de magnétisme et de fil employé, un courant électrique plus puissant tout en dépensant moins de force motrice, ce qui établit en leur faveur une supériorité que, d'ailleurs, M. Niaudet ne leur conteste pas.

Il estime cependant que, quand on voudra faire de la télégraphie sans piles, avec des machines à courant continu, la facilité extrême que l'on trouvera à faire des bobines cylindriques à fil fin, dans le

but de fournir des courants de grande tension et de peu de quantité, justifiera l'emploi de cet appareil dont la simplicité de construction rachètera le rendement inférieur, rendement dont l'importance est tout à fait secondaire pour cette application spéciale.

Machine Lontin. — La machine de M. Lontin, brevetée en 1874, est une machine dynamo-électrique à courant continu

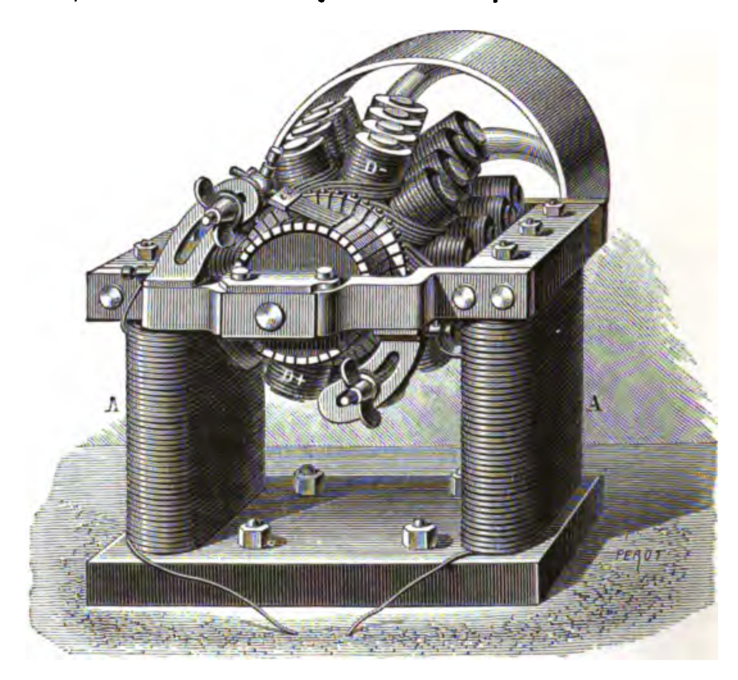


Fig. 26. — Machine Lontin à courant continu.

dont les inducteurs sont dans le même circuit que l'induit et le circuit extérieur.

Elle se distingue de la machine de Gramme par la forme de l'induit composé de quarante petites bobines D,D (fig. 26) dont les axes sont dirigés dans le sens du rayon à la façon des dents d'un engrenage, ce qui a fait donner à cette forme d'induit le nom de *pignon magnétique*.

Les quarante bobines, divisées en dix rangées de quatre bobines chacune, sont disposées en hélice sur chacune de ces ran-

gées et munies d'un noyau de fer à leur intérieur. Elles constituent ainsi une série d'électro-aimants qui, en tournant entre les pôles de l'inducteur A, prennent des polarités dont le sens change à chaque demi-révolution.

Les courants ainsi engendrés sont recueillis sur un collecteur de Gramme, par des balais formés de feuilles de cuivre minces comme du clinquant.

Le principe et la théorie de cette machine sont identiques à ceux de la machine de Gramme dont elle ne diffère que par la forme spéciale de l'induit.

M. Lontin emploie plus spécialement cette machine à l'excitation des inducteurs de sa machine à courants alternatifs que nous décrirons plus loin.

Machine Siemens. — On désigne généralement sous ce

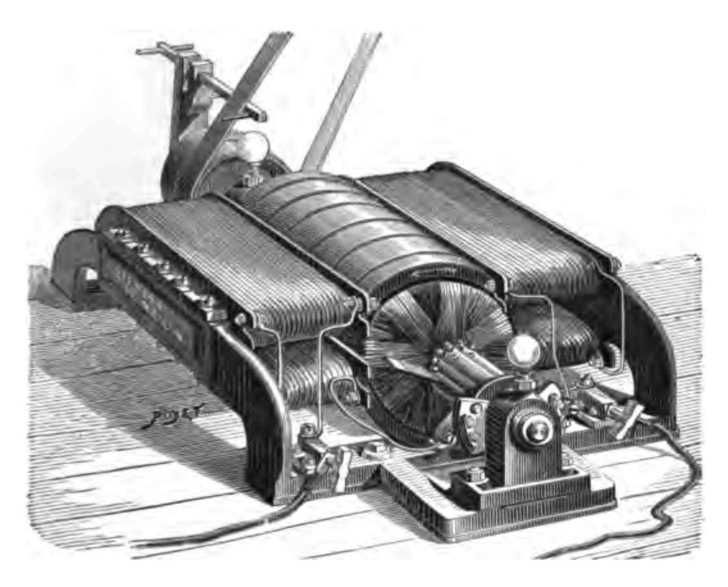


Fig. 27. — Machine à courant continu de Siemens. Moyen modèle, type horizontal.

nom les machines imaginées par M. Hefner-Alteneck, ingénieur de la maison Siemens, de Berlin. La machine de Siemens (fig. 26 et 27) est une machine Gramme à armature cylindrique qui se

distingue cependant du type qui lui a servi de modèle par plusieurs détails caractéristiques assez importants.

La bobine induite, formée de sections réunies entre elles et à un collecteur Gramme, est d'une assez grande longueur et roulée d'une façon spéciale; le fil ne recouvre que la partie *extérieure* de la carcasse en fer qui le supporte. L'induction ne se

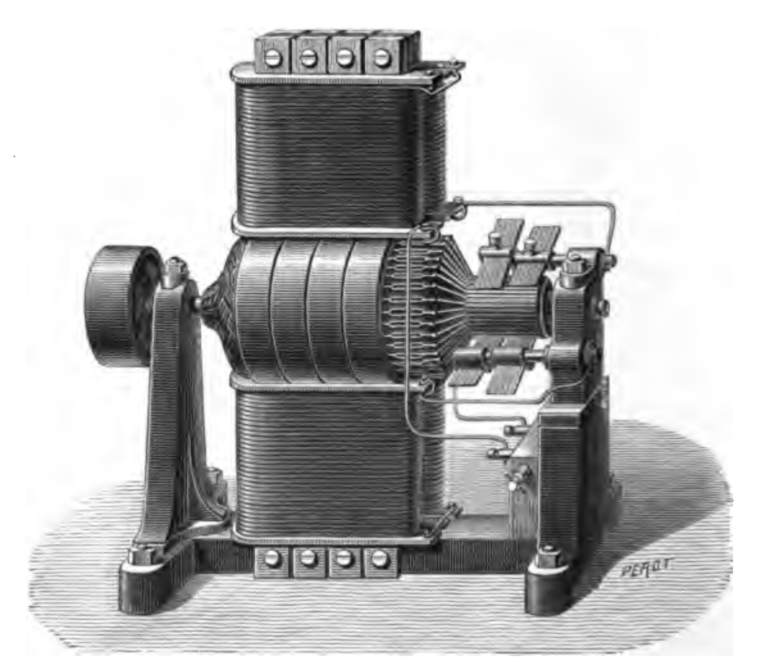


Fig. 28. — Machine à courant continu de Siemens, petit modèle.

produit ainsi que par la face extérieure qui se présente aux inducteurs, et le rôle de la carcasse en fer très légère qui remplace l'anneau en fer recuit de Gramme se trouve ici très effacé.

L'enroulement du fil est ainsi rendu plus facile, et la bobine peut être plus simplement centrée sur son axe de rotation.

Les inducteurs, formés d'une série de lames de fer, sont légèrement arqués à l'endroit de la bobine, ce qui a pour effet de bien répartir le champ magnétique en lui donnant son intensité maximum au point même où il doit agir avec le plus de puis-

sance. Le collecteur et les balais sont absolument identiques à ceux de la machine Gramme.

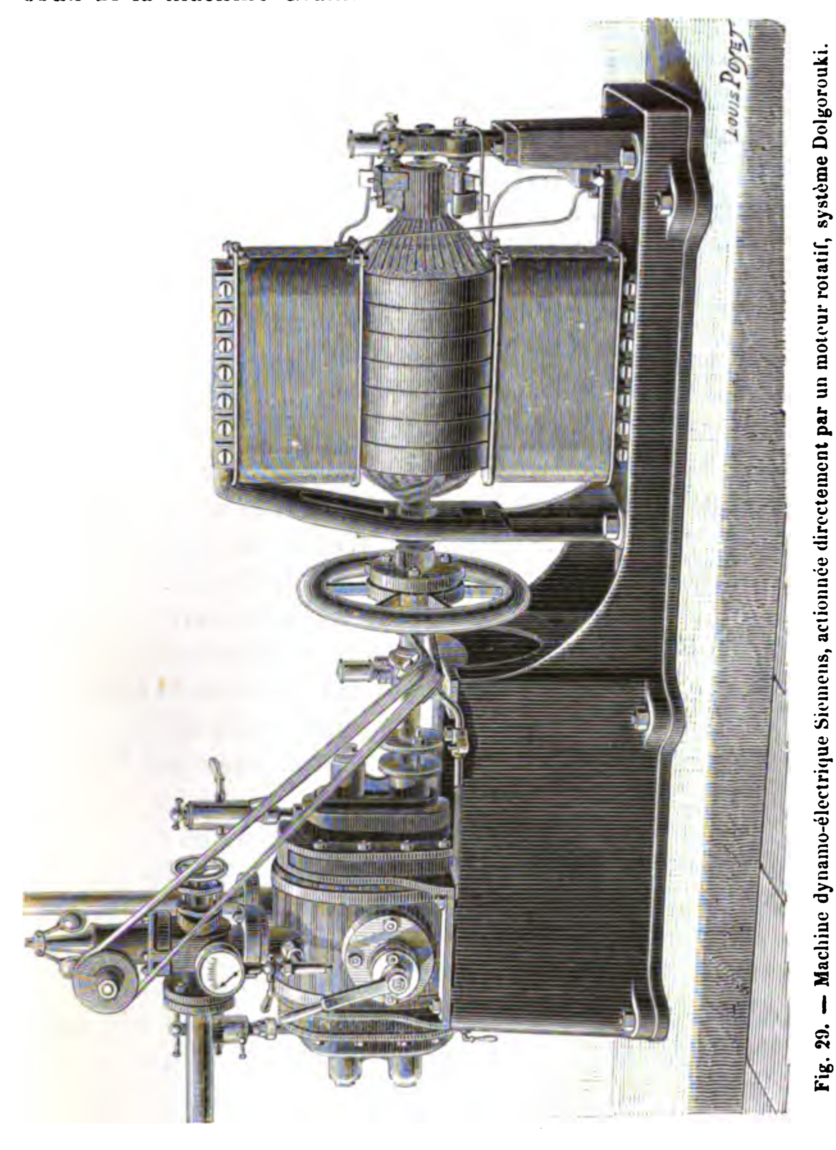


Fig. 29. — Machine dynamo-électrique Siemens, actionnée directement par un moteur rotatif, système Dolgorouki.

Sous cette forme, et en variant seulement les dimensions relatives des organes et des fils inducteurs et induits, la machine

peut s'appliquer à la galvanoplastie, à l'éclairage électrique par les régulateurs ou par l'incandescence, aux transmissions de force motrice, etc., comme la machine Gramme.

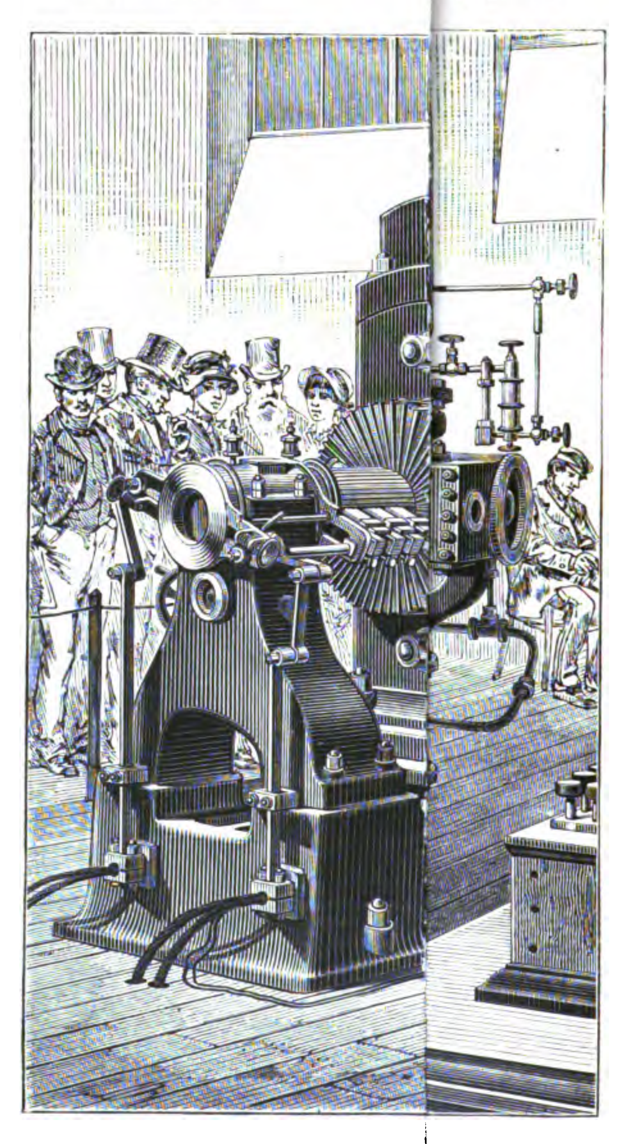
La machine du plus petit modèle (fig. 28), employée plus spécialement pour exciter les inducteurs des machines à courants alternatifs dont nous parlerons plus loin, se distingue par la disposition de ses inducteurs disposés verticalement pour ne pas placer la bobine induite trop près du sol. Les balais qui recueillent le courant sont doubles pour chaque pôle. Cette disposition a pour effet d'avoir toujours une partie métallique du collecteur en contact avec un des balais lorsque l'autre balai rencontre une partie isolée, ce qui donne un courant plus régulier.

Malgré la stabilité que présente le type horizontal, M. Siemens paraît y renoncer à cause de l'emplacement que ces machines occupent dans une installation un peu importante. La figure 29 représente le dernier modèle adopté mis en mouvement par un moteur rotatif, système Dolgorouki. C'est celui qui actionne le générateur électrique du chemin de fer de Lichterfelde. L'installation est ainsi réduite à ses dimensions minima.

Machine Wallace Farmer. — Ce n'est qu'une disposition plus ou moins heureuse du principe de l'anneau et du collecteur de Gramme. Elle a été d'abord imaginée par Moses Farmer, de Boston, en 1875, puis construite et perfectionnée par William Wallace, d'Ansonia (Connecticut).

Cette machine se compose d'un disque portant deux séries de bobines méplates, pour mieux utiliser la surface des disques; chacune de ces bobines est reliée à la suivante et à un collecteur Gramme comme dans la machine de Niaudet (p. 57). Les inducteurs sont disposés en tension dans le circuit extérieur. La machine est double et chacune de ses moitiés peut agir indépendamment, ou bien on peut réunir ces deux moitiés, soit en quantité, soit en tension.

Machine Bürgin. — En 1877, M. Bürgin, de Bâle, voulant aussi rapprocher la masse de l'anneau des inducteurs, a imaginé une machine dynamo-électrique dans laquelle l'induction se fait



GRANDE MA(

sur huit anneaux distincts R montés les uns à côté des autres sur le même arbre. Le noyau magnétique de chaque anneau est un cadre hexagonal en fils de fer sur le côté duquel on enroule les hélices induites, en forme de fuseau, plus épais au milieu, de sorte que les angles du cadre se trouvent à peu près sur la même circonférence que les spires extérieures des hélices roulées en fuseau, et passent ainsi très près des pôles inducteurs. Les huit anneaux sont montés un peu *en retrait* l'un par rapport à l'autre pour que les bobines se présentent successivement devant les inducteurs, comme dans le pignon magnétique de M. Lontin (fig. 26). Les 48 bobines sont reliées entre elles et à un collec-

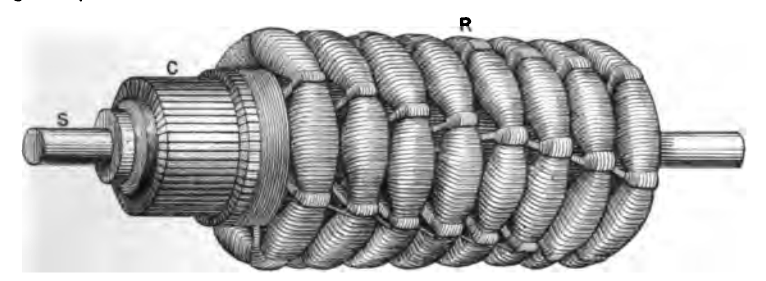


Fig. 30. — Induit de la machine Bürgin.

teur C comme les bobines de la machine de Gramme, et le fonctionnement en est identique.

Les inducteurs sont en fonte et montés en tension sur le circuit général. Cette machine présente l'avantage d'être assez rustique, facile à construire, et permet de fixer avec précision les anneaux sur l'axe de rotation.

Machine Edison. — Les machines envoyées par Edison à l'Exposition d'électricité, et destinées à alimenter ses lampes électriques, appartiennent à deux types qui ne diffèrent entre eux que par la position des électro-aimants inducteurs et les dimensions. La figure 31 représente une coupe de l'induit qui diffère par sa construction de tous ceux qui ont été construits jusqu'ici, et la planche II représente une vue d'ensemble de la grande machine de 120 chevaux, la plus puissante qui ait été construite jusqu'à ce jour.

Les inducteurs sont formés de longues barres d'électro-aimants — au nombre de deux dans le type vertical, et de huit dans la grande machine, — ils sont roulés d'un fil relativement fin et établi en *dérivation* (montage Wheatstone), sur les collecteurs. On règle leur puissance, et par suite la force électro-motrice de la machine, en introduisant ou en enlevant des résistances additionnelles dans le circuit d'excitation à l'aide d'un rhéostat manœuvré *à la main*.

Nous n'avons pas encore réussi à nous expliquer l'utilité des dimensions, véritablement gigantesques, de ces électro-aimants, eu égard aux dimensions de l'anneau, et qu'on trouve seulement dans la machine Edison.

L'induit (fig. 31) est fondé sur le principe de l'enroulement

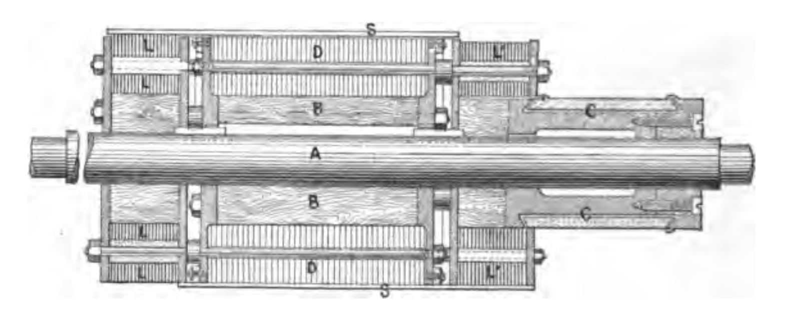


Fig. 31. — Coupe longitudinale de l'induit de la machine Edison.

Siemens et du collecteur Gramme. Il se compose d'un noyau en bois B sur lequel est fixée une série de disques de fer D séparés par des rondelles de papier dont le but est de sectionner la masse magnétique et par suite de faciliter les aimantations et désaimantations sous l'influence des inducteurs. Sur le tambour ainsi formé se trouve une série de bandes longitudinales de cuivre S isolées par des lames de mica, — la grande machine porte 146 de ces barres, — les barres doivent être liées entre elles et au collecteur pour former un circuit complet, fermé sur lui-même, comme dans la machine Siemens. Ces jonctions s'effectuent à l'aide de disques plats de cuivre LL, placés à chaque extrémité

du tambour et séparés par des lames minces de mica. Chacun de ces disques portent deux oreilles saillantes presque diamétralement opposées qui viennent s'appliquer chacune aux extrémités de deux barres entre lesquelles on veut faire la liaison. On réunit ainsi les barres entre elles en introduisant le moins possible de résistances nuisibles aux extrémités.

Comme les lames L, L, présentent une certaine épaisseur, et que les jonctions nécessaires des barres s'effectuent par des lames successives, il en résulte que leurs extrémités se présentent en forme de spirale à chaque bout du tambour. Le collecteur C, ne présente aucune disposition importante ou nouvelle.

La grande machine d'Édison est mise en action directement par un moteur à vapeur de 125 chevaux : la vitesse de l'induit, dont le diamètre est d'environ 1 mètre, est de 360 tours par minute; sa résistance intérieure est excessivement petite, ce qui permet d'alimenter un grand nombre de lampes à incandescence en dérivation; à l'Exposition, il y en a eu jusqu'à 500 en activité, mais on affirme que leur nombre peut atteindre 1000.

Machine Brush. — Le but poursuivi par M. Brush est tout différent. M. Brush s'est préoccupé surtout de produire une machine de grande tension, et non pas de grand volume comme la machine Édison, et il y a réussi puisqu'on a pu voir pendant toute la durée de l'Exposition, une seule machine alimenter *quarante* foyers sur un seul circuit, ou envoyer à l'Opéra le courant nécessaire à l'alimentation de *trente-huit* lampes sur un circuit dont le développement dépasse six kilomètres.

En principe la machine Brush est un anneau Pacinotti, à huit ou à douze bobines, tournant entre deux paires d'électro-aimants puissants, alimentés par la machine elle-même. La figure 32 représente l'anneau en fonte, du type de 16 foyers et la figure 33, l'ensemble de la machine du type de 32 foyers, mise en action directe par un moteur à vapeur à trois cylindres, système Brotherhood. Les bobines de l'anneau diamétralement opposées sont reliées deux à deux (fig. 32); les extrémités libres des fils sont fixées à quatre commutateurs très différents, en principe,

du collecteur Gramme. L'anneau est sillonné de rainures profondes qui réduisent sa masse, augmentent sa surface de refroidissement et entravent, dans une certaine mesure, les courants de Foucault qui tendraient à se produire dans sa masse, sous l'action du champ magnétique dans lequel il se meut si rapidement.

Si on étudie avec soin ce qui se passe dans chaque paire de bobines prise isolément pendant un tour complet de la machine, on

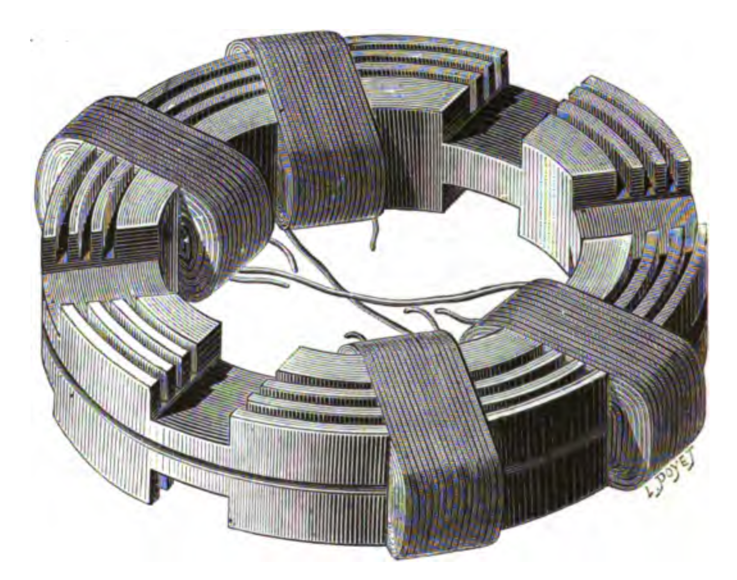
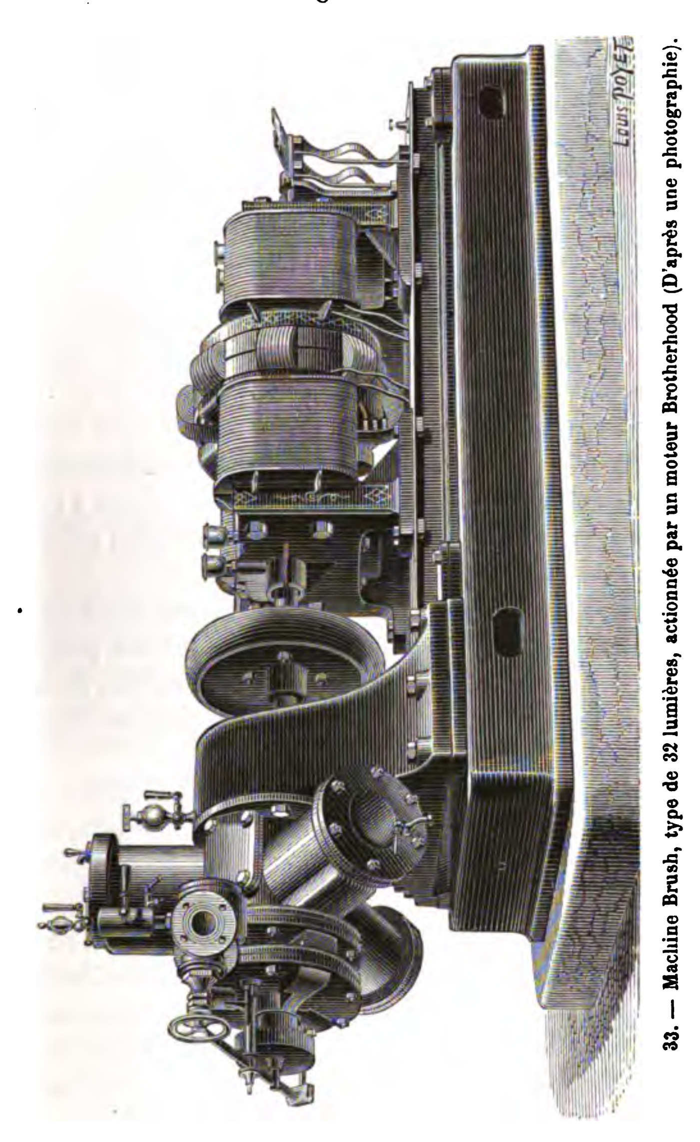


Fig. 32. — Anneau de la machine Brush (quatre bobines sont enlevées pour montrer les dispositions de l'anneau.

voit qu'elle est traversée par deux courants de signe contraire, et, par suite, qu'au moment du changement de signe du courant, deux fois par tour, la paire de bobines considérée n'est le siège d'aucun courant, c'est-à-dire qu'il ne s'y développe aucune force électromotrice. Si, à ce moment, le courant engendré par la machine traversait la bobine, il le ferait en pure perte, car la paire de bobines intercalée jouerait le rôle d'une résistance inerte, et par suite d'une résistance nuisible.

Le commutateur de M. Brush supprime cette paire de bobines

du circuit, au moment où aucun courant ne la traverse, ce qui est une condition très avantageuse.



33. — Machine Brush, type de 32 lumières, actionnée par un moteur Brotherhood (D'après une photographie).

Les collecteurs envoient le courant engendré dans les inducteurs et le circuit extérieur ; pour régler la puissance de la ma-

chine, M. Brush introduit une dérivation plus ou moins résistante entre les extrémités des fils des inducteurs. Le courant produit se partage alors entre les inducteurs et cette résistance, le champ magnétique s'affaiblit plus ou moins et par suite la force électromotrice de la machine, sans qu'on ait besoin de changer son allure.

Machine Hefner-Alteneck. — Cette machine est toute nouvelle et il faudrait, pour l'expliquer complètement, se reporter au générateur à courants alternatifs de Siemens que nous décrirons plus loin. Par une disposition ingénieuse de commutateurs et de collecteurs, M. Hefner-Alteneck est parvenu à transformer la machine à courants alternatifs sans fer en machine à courants continus. Les expériences sont encore trop récentes pour que les avantages de cette transformation aient encore été mis nettement en relief, mais le résultat est intéressant en ce sens qu'il montre la tendance actuelle des inventeurs à créer des machines à courants continus dont l'usage est plus général que celui des machines à courants alternatifs.

Machines diverses. — Le nombre des machines nouvelles à courant continu s'accroît chaque jour dans des proportions vraiment effrayantes, et l'on a peine à les suivre. Nous nous sommes contenté de signaler celles qui présentent des dispositions intéressantes ou nouvelles.

M. *Maxim*, de New-York, a combiné un générateur à anneau de Gramme et à inducteur genre Siemens, caractérisé surtout par le mode de réglage du courant que nous étudierons à propos des applications de l'éclairage électrique.

M. *Weston* a eu surtout en vue de ventiler l'anneau en le faisant à claire-voie pour permettre une libre circulation de l'air.

M. *Jüngers*, de Copenhague, voulant utiliser également les deux faces de l'anneau Gramme, a eu l'idée de placer un second inducteur fixe à l'intérieur de l'anneau et de réagir ainsi sur les deux faces du fil. L'expérience seule pourra faire connaître les avantages pratiques de cette disposition plus compliquée.

M. *Gülcher*, dans son système d'éclairage électrique où toutes

les lampes à arc voltaïque sont établies en dérivation, a combiné une machine à quatre pôles à gros fils pour produire beaucoup de quantité. L'anneau genre Gramme est aplati, l'induction se fait par les deux faces, et les deux inducteurs en regard sont reliés par une armature en U qui entoure l'anneau pour l'induire sur trois de ses faces.

Nous arrêterons là cette énumération qui demanderait un volume pour être complète : le nombre des combinaisons possibles est indéfini ; toutes n'ont pas encore été essayées, et nous ne désespérons pas de voir s'étendre la liste déjà trop longue des générateurs mécaniques d'électricité : l'expérience seule permettra de faire un choix et de réduire le nombre des types véritablement industriels.

B. — Machines a courants alternatifs.

Si nous considérons une spire d'une bobine induite pendant une révolution entière accomplie par l'ensemble mobile, — inducteur ou induit, — autour de son axe de révolution, nous savons que pour chaque tour, elle est traversée par deux ou un nombre pair de courants alternativement de sens contraire ; c'est par un artifice plus ou moins heureux, plus ou moins habile, que l'on recueille ces courants dans le circuit extérieur de façon à les obtenir toujours dans le même sens et à produire un courant continu. Dans certaines applications, il est absolument inutile de redresser ces courants ; pour certaines machines même, comme celles de *l'Alliance* par exemple, ce redressement des courants ne s'effectuait pas sans de grandes pertes, faciles à éviter en se contentant de recueillir les courants, sans redressement.

Les machines qui réalisent ces conditions sont des machines à *courants alternatifs*, et se divisent en deux classes, comme les machines à courant continu, suivant que les inducteurs sont des aimants permanents (*magnéto-électriques*) ou des électro-aimants (*dynamo-électriques*).

c. — Machines magnéto-électriques à courants alternatifs.

Il suffit de supprimer le commutateur redresseur des machines magnéto-électriques de *Pixii*, *Clarke*, *Page*, *Siemens* et de le remplacer par un simple *collecteur* de courants pour obtenir des appareils à courants alternatifs dont la puissance dépendra, comme dans les machines à courant continu, de l'intensité du champ magnétique, de la vitesse de rotation des bobines, de leurs dimensions, de leur nombre, etc.

Machines de *l'Alliance*. — C'est en 1849 que *Nollet*, professeur de physique à l'École militaire de Bruxelles, proposa de construire une machine de Clarke sur une grande échelle et créa la machine connue aujourd'hui sous le nom de *Machine de l'Alliance.*

Après des déboires sans fin, dont on trouvera les détails dans l'*Exposé des applications de l'électricité*, de M. le comte du Moncel, les machines de *l'Alliance*, étudiées pour fournir des courants *continus*, furent, sur les conseils de Masson, professeur de physique à l'École centrale, transformées en machines à courants *alternatifs*. Elles donnèrent, par cette simple transformation, des résultats incomparablement meilleurs et furent adoptées, dès 1863, pour l'éclairage électrique des phares de la Hève.

La machine de *l'Alliance* est aujourd'hui bien connue, nous nous contenterons d'en signaler le principe : c'est une machine de Clarke de grandes dimensions dont les dispositions mécaniques sont combinées pour permettre de multiplier les bobines d'induction et les aimants inducteurs aussi commodément et aussi simplement que possible.

Pour cela les bobines sont disposées sur des disques et tournent entre les pôles d'aimants en fer à cheval distribués tout autour de la circonférence ; chaque disque porte de 8 à 16 bobines. La machine du plus grand modèle construite jusqu'ici porte 6 disques de 16 bobines chacun et 56 aimants inducteurs. Pour chaque

tour de la machine, les fils des bobines sont traversés par des courants qui changent de sens chaque fois qu'une bobine passe devant les pôles des inducteurs.

Pour une vitesse de 400 tours par minute, on obtient plus de 100 changements de sens de courant par seconde. Suivant que ces machines doivent fournir de la quantité ou de la tension, — on sait ce qu'il faut entendre par là, — les bobines sont reliées aux collecteurs, soit en dérivation, soit en tension.

Les machines de *l'Alliance* à courants alternatifs sont de bonnes machines, fonctionnant très régulièrement et d'un rendement satisfaisant; elles ne se vulgarisent pas parce qu'elles exigent un emplacement assez grand relativement à leur puissance, qu'elles sont trop lourdes et que leur prix est trop élevé eu égard au travail qu'elles transforment en électricité. A ce point de vue, on peut les comparer aux machines à vapeur à basse pression, à condenseur et à faible vitesse, d'un bon rendement, mais auxquelles on préfère, en général, les machines à grande vitesse, à haute pression et sans condenseur qui, à puissance égale, sont moins lourdes, moins chères et moins encombrantes.

Machine de M. de Méritens. — La machine imaginée en 1878 par M. de Méritens, est aussi magnéto-électrique, mais elle se distingue des machines de *l'Alliance* par la forme des bobines et par la manière dont se développent les courants d'induction dans les fils qui entourent l'anneau induit.

Nous empruntons la théorie de cette machine à l'ouvrage de M. du Moncel sur l'*Éclairage électrique :*

« Pour comprendre le fonctionnement de la machine de M. de Méritens, imaginons un anneau Gramme (fig. 34) divisé, par exemple, en quatre sections isolées magnétiquement l'une de l'autre et constituant par conséquent quatre électro-aimants arqués, placés bout à bout. Imaginons que le noyau de fer de chacune de ces sections soit terminé à ses deux extrémités par une pièce de fer AB, formant comme un épanouissement de ses pôles, et supposons que toutes ces pièces, réunies par l'intermé-

diaire d'une pièce de cuivre CD, constituent un anneau solide autour duquel sont disposés des aimants permanents NS, NS, avec leurs pôles alternés de l'un à l'autre. Examinons ce qui se passera quand cet anneau accomplira un mouvement de rotation sur lui-même, et voyons d'abord les effets qui résulteront, par exemple, du rapprochement du pôle épanoui B, quand, marchant de gauche à droite, il s'approchera de N. A ce moment, il se développera dans l'hélice électro-magnétique de AB un cou-

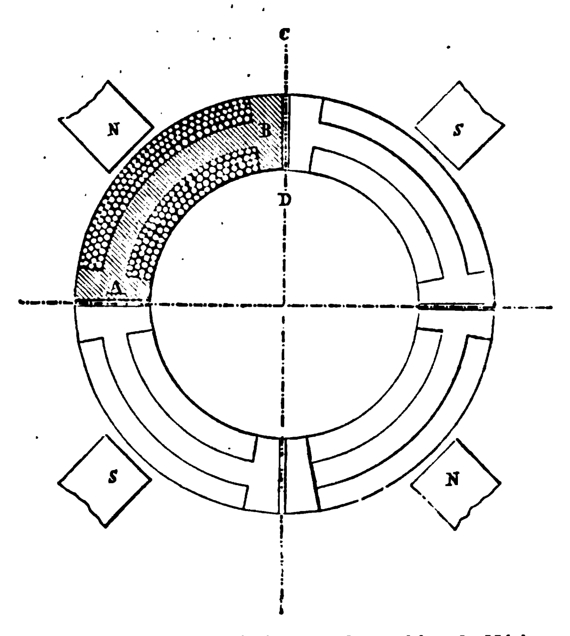


Fig. 34. — Diagramme théorique de la machine de Méritens.

rant induit d'aimantation, comme dans une machine de Clarke : ce courant sera instantané et de sens inverse aux courants particulaires d'Ampère de l'aimant inducteur, il sera très énergique en raison de la proximité de B du pôle N ; et dans le noyau AB une série de déplacements magnétiques, qui donneront naissance à une série de courants d'inversion polaire, qui se manifesteront de B en A ; ces courants seront directs par rapport aux courants particulaires de N, mais ils ne sont pas instantanés et vont en

croissant d'énergie de B en A. A ces courants se joindront simultanément les courants d'induction dynamique résultant du passage des spires de l'hélice devant le pôle N. Quand A abandonnera N, un courant de désaimantation se produira, égal en énergie et de même sens que le courant d'aimantation résultant du rapprochement de l'épanouissement B du pôle N. L'effet est en effet alors produit à une extrémité différente du noyau magnétique, et l'hélice se présente à l'action d'induction d'une manière inverse. Donc courants induits inverses de l'inducteur par le fait du rapprochement et de l'éloignement des appendices A et B, courants

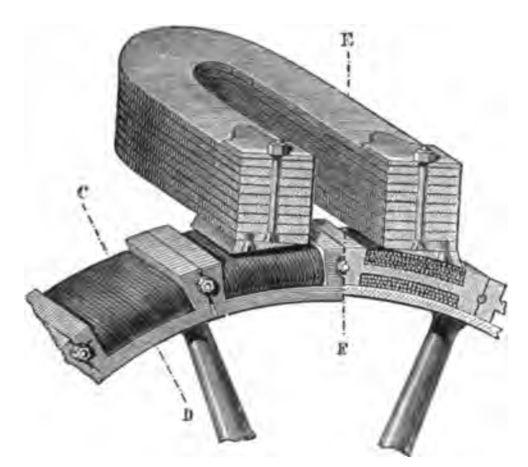


Fig. 35. — Détails de la machine de Méritens.

induits directs pendant le passage de la longueur du noyau ABS devant l'inducteur, courants induits directs résultant du passage de spires devant N. Toutes les causes d'induction se trouvent donc ainsi réunies dans cette combinaison.

« Afin d'augmenter encore les effets d'induction, M. de Méritens compose le noyau AB et les appendices A et B avec les lames minces de fer découpées à l'emporte-pièce, comme on le voit sur la figure 35, et juxtaposées en faisceaux au nombre de cinquante ayant 1 millimètre d'épaisseur chacun. Les fils des hélices sont d'ailleurs reliés de manière que les courants indirects puissent

être associés en tension, en quantité ou en séries, suivant les conditions de l'application. Nous n'avons considéré, dans la figure théorique que nous avons donnée, que quatre sections. Mais, par le fait, il y en a un plus grand nombre, et, dans le modèle dont nous avons parlé, il y en a seize que l'on distingue

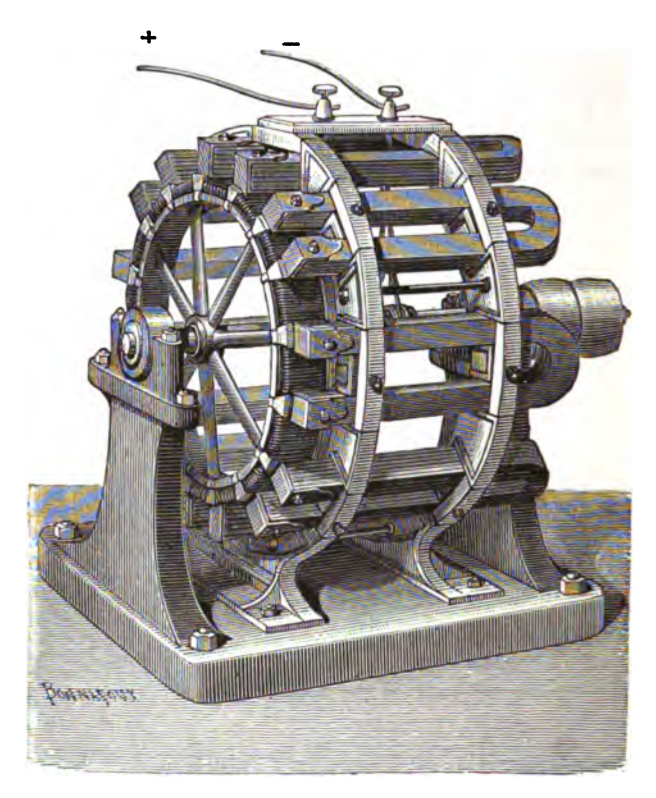


Fig. 36. — Machine Méritens.

aisément (fig. 36). Elles sont montées sur une roue en bronze adaptée à l'arbre du moteur. C'est au-dessus de cette roue que se trouvent encastrés les aimants inducteurs qui sont fortement fixés sur deux carcasses en bronze, où ils sont disposés horizontalement. On distingue, figure 38, la manière dont ces différents organes sont montés.

« Pour peu que l'on considère le mode de disposition de l'an-

neau induit, on reconnaît aisément qu'il se trouve dans les meilleures conditions possibles de construction. En effet, comme chaque section est séparée, elle peut être démontée isolément et l'on peut par conséquent l'enrouler de fils sans aucun embarras. D'un autre côté, la composition du noyau avec des lames juxtaposées qui peuvent être découpées d'un seul coup à l'emporte-pièce, est un énorme avantage, car ce système dispense de la précision nécessaire dans la construction de ces anneaux, toujours difficiles à maintenir parfaitement ronds.

Pour l'éclairage des phares, M. de Méritens a construit sur le même principe, une machine à cinq disques dont l'aspect extérieur est celui des machines de *l'Alliance*.

Les cinq anneaux induits mobiles, qu'on peut grouper en tension, en quantité, ou employer séparément, suivant les besoins, tournent devant les *extrémités* des aimants, au lieu de tourner devant les faces, comme dans la machine à un disque.

C'est le seul exemple de machine industrielle magnéto à courants alternatifs que nous ayons vu figurer à l'Exposition d'électricité.

d. — Machines dynamo-électriques à courants alternatifs.

Nous savons que les machines dynamo-électriques se distinguent des machines magnéto-électriques par la nature des inducteurs qui sont des *électro-aimants* pour les premières, tandis que les secondes emploient des aimants permanents en acier.

Dans les machines à *courants continus*, le courant produit par la machine elle-même est utilisé pour l'aimantation des inducteurs, condition que ne peuvent réaliser les courants alternatifs (sous réserve de certains artifices dont nous parlerons plus tard).

Il en résulte que, pour constituer une machine dynamo-électrique à courants alternatifs, il est nécessaire d'employer deux machines : la première, qu'on appelle *excitatrice, induisante* ou

amorçante (le nom d'excitatrice tend aujourd'hui à prévaloir), d'un volume relativemeut petit, sert à exciter les électro-aimants de la seconde, qu'on nomme *distributrice*, *machine à division* ou *machine à lumière*, et qui fournit des courants alternatifs dans un ou plusieurs circuits.

Les systèmes que nous allons examiner maintenant, Lontin, Gramme et Siemens, emploient tous deux machines, une excitatrice à courant continu et une machine à division.

Machine à courants alternatifs de M. Lontin. — C'est M. Lontin qui a construit la première machine dynamo-électri-

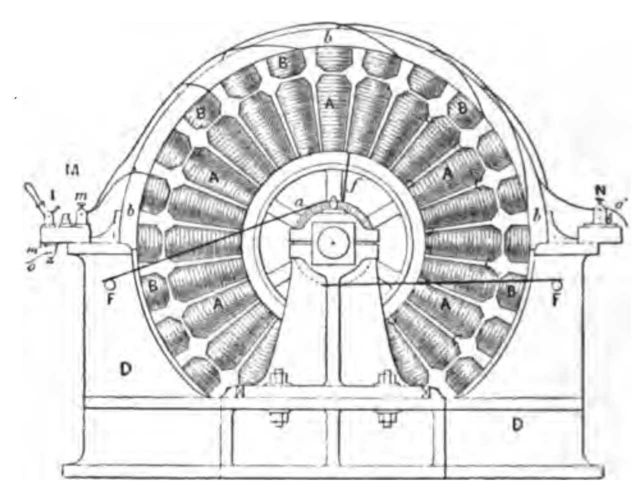


Fig. 37. — Machine à division de M. Lontin.

que à courants alternatifs avec machine excitatrice spéciale. L'*excitatrice* de M. Lontin est la machine à courants continus que nous avons décrite page 58.

Le courant de l'excitatrice arrive dans le pignon de la machine à division (fig. 37) par deux frotteurs fixés aux bornes F, F. Ce pignon tournant autour d'un axe horizontal se compose de vingt-quatre dents de fer enveloppées chacune d'une hélice en fil de cuivre traversée par le courant de l'excitatrice qui aimante chacune des dents en alternant les pôles à la circonférence extérieure.

Extérieurement au pignon mobile se trouve une couronne fixe portant aussi vingt-quatre dents fixées à l'intérieur de cette couronne, et formant ainsi une série de bobines dont toutes les extrémités des fils entourant les noyaux aboutissent à un *manipulateur* dont nous examinerons la fonction tout à l'heure.

En imprimant au pignon magnétique un mouvement de rotation rapide, les dents du pignon, en passant devant les bobines B, développent des courants d'induction dont le sens varie vingt-quatre fois par tour. La machine à 24 bobines, tournant en marche normale à la vitesse de 360 tours par minute, il se produit 8,640 changements de polarité dans le noyau des bobines B, c'est-à-dire 8,640 courants alternativement de sens contraire, soit 144 inversions par seconde.

Les extrémités des fils des bobines B arrivent au manipulateur M, et sont fixées à des bornes *m*. Le manipulateur permet de combiner les bobines en les groupant, soit en tension, soit en quantité, et en nombre plus ou moins grand. On peut, à volonté, constituer 24 circuits distincts, ou disposer les 24 bobines, *par séries*, sur un seul circuit, et alimenter un seul foyer puissant.

Dans cette machine l'induit est fixe et l'inducteur mobile, comme dans la machine de Pixii multiple, avec cette différence que l'aimant mobile est remplacé par un électro-aimant qui, à poids égal, a vingt fois plus de puissance qu'un aimant permanent.

Machine de Gramme. — Dans cette machine, comme dans celle de M. Lontin qui l'a précédée, l'induit est fixe, et les inducteurs, surexcités par une machine Gramme type d'atelier (p. 55), sont mobiles. L'inducteur (fig. 38) est constitué par un pignon magnétique formé de 8 électro-aimants droits à pôles alternés qui fournissent dans chacune des sections de l'hélice induite des courants alternativement renversés.

L'induit fixe est un cylindre de fer assez long disposé comme l'anneau des machines à courant continu du même inventeur.

On voit sur le diagramme (fig. 38) que, les fils de l'induit étant fixes, on peut les associer de différentes façons. Chaque huitième de la circonférence de l'anneau est partagé en quatre sections; les trente-deux sections ou éléments sont réunies en quatre groupes formés de sections prises quatre à quatre ; toutes les sections *a* sont réunies en un premier groupe, car il suffit d'examiner la figure pour voir que toutes les sections *a* sont placées de la même façon par rapport aux huit pôles de l'inducteur mobile, ce qui commande leur association ; de même les sections *b* sont réunies

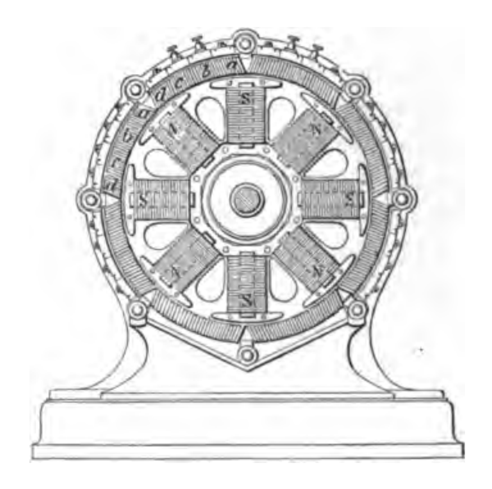


Fig. 38. — Diagramme de la machine Gramme à courants alternatifs.

au deuxième groupe ; les sections *c*, au troisième et les sections *d*, au quatrième. Mais en mettant soixante-quatre sections sur l'anneau au lieu de trente-deux, bien d'autres combinaisons sont possibles.

Il n'y a, comme dans la machine à division de M. Lontin, aucun commutateur ; deux frotteurs mobiles, en forme de balais ou de brosses, appuient sur deux cercles distincts et amènent le courant de l'excitatrice au pignon mobile.

La machine est enfermée entre deux montants de fonte de fer latéraux et enveloppée par un certain nombre de planches d'aca-

jou (fig. 39) qui protègent efficacement l'anneau extérieur contre tous les chocs.

M. Gramme construit plusieurs modèles de machines de ce type depuis celles qui alimentent 4 bougies Jablochkoff sur un

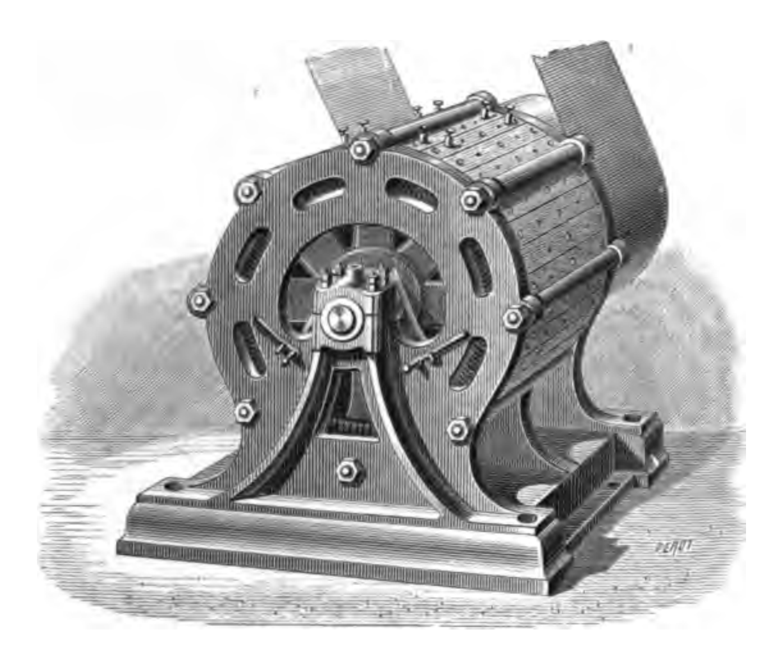


Fig. 39. — Machine Gramme à courants alternatifs.

seul circuit jusqu'aux machines employées à l'Hippodrome qui fournissent le courant électrique à 60 bougies disposées en douze circuits de 5 bougies chacun.

Machine de Siemens. — La machine de H. Hefner von-Alteneck, construite par la maison Siemens, ce qui lui fait donner ce nom, se distingue par ce fait qu'à l'inverse des machines Lontin et Gramme, les inducteurs sont fixes et les induits mobiles.

La machine excitatrice est la machine Siemens petit modèle, représentée figure 28, page 60. Le courant de cette excitatrice est envoyé dans un inducteur formé de 32 électro-aimants fixes dis-

posés sur deux couronnes en fonte, 16 de chaque côté de l'induit mobile (fig. 40).

L'extrémité du noyau de chacun de ces électro-aimants porte une petite plaque de fer destinée à former un épanouissement du pôle et à faciliter ainsi l'induction ; ces pôles sont alternativement de sens contraire. Les induits se composent de 16 bobines plates fixées sur un plateau et tournant très rapidement dans l'es-

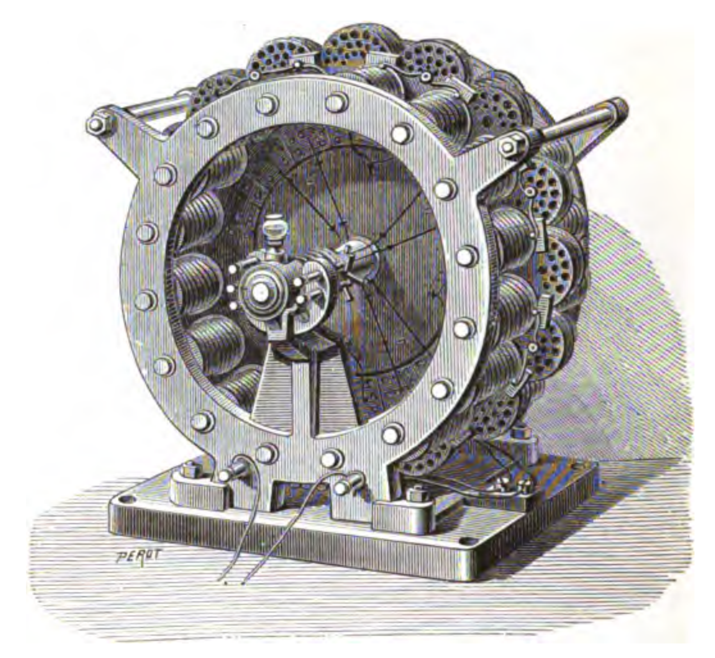


Fig. 40. — Machine à division de Siemens.

pace annulaire entre les deux séries d'inducteurs. Ces bobines induites ne renferment pas de noyau de fer, comme les autres systèmes ; le courant ne s'y développe donc que par le passage des spires des hélices dans le champ magnétique des inducteurs, et non pas par des surexcitations magnétiques et des interversions de polarité de leurs noyaux.

Les bobines sont préalablement groupées de la façon qui convient le mieux aux effets qu'on a en vue, et les courants sont

recueillis à l'aide de balais qui viennent frotter sur des collecteurs reliés aux extrémités des fils des bobines induites. La machine à 16 bobines du type que nous venons de décrire est divisée en deux circuits pouvant alimenter chacun 10 lampes différentielles de Siemens. Il suffit pour cela de trois fils partant de la machine, car l'un d'eux, le *fil de retour*, peut être commun aux deux circuits.

Machine Lambotte-Lachaussée. — Dans ce générateur, les inducteurs sont mobiles et les bobines induites fixes, comme dans la machine Lontin. Les formes des inducteurs et des induits rappellent celles des machines Siemens, seulement les bobines induites fixes renferment un noyau de fer ; elles sont facilement démontables, ce qui permet leur remplacement rapide en cas d'avarie. Un *manipulateur* analogue à celui de M. Lontin permet de grouper les bobines suivant le nombre de foyers et de circuits à alimenter. A l'Exposition, la machine produisait le courant nécessaire aux lampes-soleil éclairant la galerie de tableaux. On pourrait surtout, au point de vue pratique, reprocher à cette machine le ronflement insupportable résultant de la forme même des parties mobiles. Les inducteurs sont excités par une petite machine Gramme séparée.

Machines diverses. — M. *Jablochkoff* a exposé une machine à courants alternatifs à inducteurs mobiles, de forme hélicoïdale, et à induits fixes, disposés en cercle autour des inducteurs et fermés par des barreaux de fer doux entourés de fil.

Dans la section autrichienne, M. *Kremenecky* avait aussi exposé une machine à courants alternatifs à bobines induites fixes sans fer et à inducteurs mobiles, excités par une machine spéciale. C'est encore une disposition renversée de la machine Siemens.

En signalant la machine *Hopkinson-Muirhead* et celle de M. *A. Gérard*, qui ne présentent pas d'ailleurs une grande importance pratique, nous aurons passé en revue toutes les machines alternatives qui figuraient à l'Exposition d'électricité. Cette disette relative montre que les études et les travaux ne portent surtout que du côté des machines à courants continus, les seules d'ailleurs

qui permettent de réaliser complètement des distributions d'électricité.

e. — Machines auto-excitatrices.

Toutes les machines dynamo-électriques à courants alternatifs que nous venons d'examiner jusqu'ici, nécessitent, comme nous l'avons vu, l'emploi de deux machines, l'excitatrice et la machine proprement dite.

On désigne sous le nom d'*auto-excitatrices*, toutes les machines dans lesquelles on supprime l'excitatrice, sinon totalement, du moins comme machine distincte et séparée. L'avantage de cette disposition réside dans une simplicité plus grande de la transmission, une certaine simplification dans le mécanisme et une économie de prix d'achat.

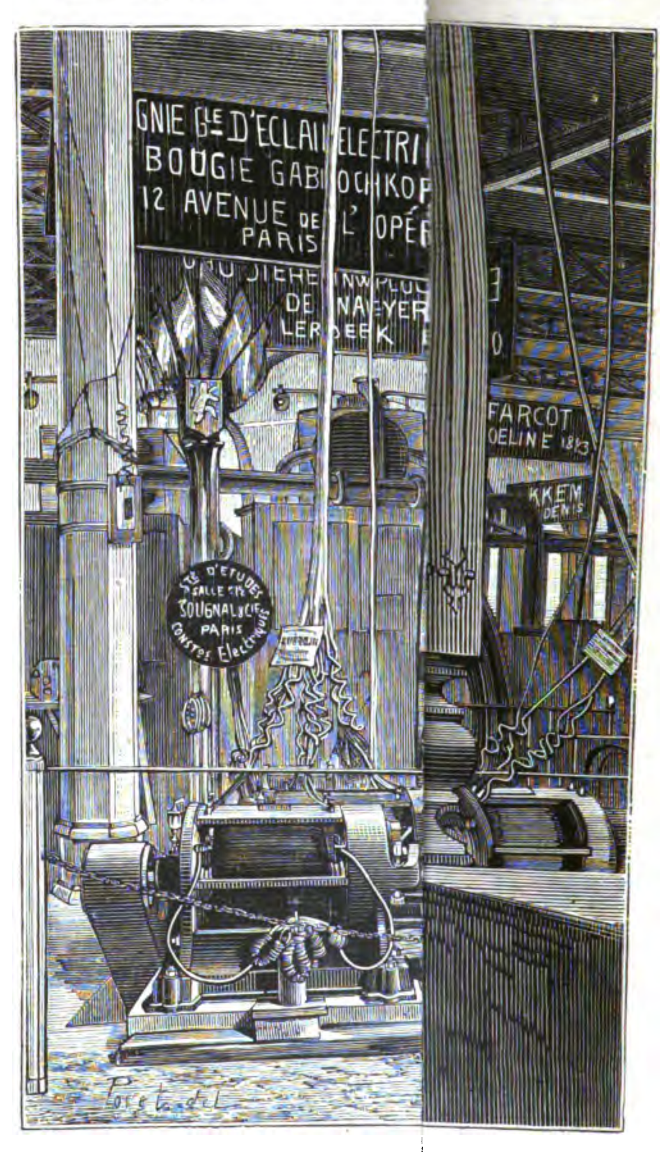
Machine de Wilde. — La première machine à courants alternatifs de cette nature a été imaginée par *Wilde* dès 1867 ; délaissée pendant quelques années, elle est employée aujourd'hui pour les bougies électriques du même inventeur.

La machine de Wilde auto-excitatrice a l'aspect extérieur de la machine Siemens à courants alternatifs, moins l'épanouissement des extrémités polaires des inducteurs, et les noyaux de fer qui garnissent les bobines induites dans le système de Wilde. Pour exciter les inducteurs, M. *Wilde* emploie le courant fourni par *une partie des bobines induites*, après l'avoir fait passer dans un commutateur redresseur convenablement approprié.

Les autres bobines sont reliées à un collecteur analogue à celui de la machine Siemens. La machine Wilde est donc auto-excitatrice, en ce sens que les inducteurs sont alimentés sans l'emploi d'une machine séparée.

On a donc à la fois une machine dynamo-électrique à courant direct et une machine dynamo-électrique à courants alternatifs sur le même axe.

Machine de M. Gramme. — En 1879, M. *Gramme* a construit une machine auto-excitatrice un peu différente. Elle se compose en réalité de deux machines distinctes, mais montées



LES MACHINES

sur le même bâti et mises en mouvement par le même axe, et par suite tournant rigoureusement à la même vitesse ; l'une d'elles est une machine Gramme dynamo-électrique à courants directs, servant d'excitatrice, l'autre une machine à courants alternatifs analogue à celle que nous avons décrite page 78.

A puissance égale, ces machines coûtent 50 p. 100 moins cher que les types anciens à excitatrice séparée, elles sont aussi moins lourdes, moins encombrantes, et plus faciles à installer ; si elles ne constituent pas une invention de grande valeur scientifique, elles ne représentent pas moins un progrès d'une certaine importance au point de vue pratique.

Le téléphone machine magnéto-électrique. — Pour compléter la liste des appareils qui transforment le travail mécanique en électricité, nous devons signaler le plus sensible et le plus délicat de tous, le téléphone électro-magnétique de Graham Bell et ses nombreux dérivés. Tous les téléphones magnétiques sont de véritables générateurs électriques qui, sous l'influence du travail mécanique résultant des vibrations qui constituent le son, engendrent des courants électriques ondulatoires d'intensité proportionnée à ces vibrations. On peut assimiler, à ce point de vue, le téléphone Bell à une machine de Page dont la plaque représenterait le barreau de fer doux mobile sous l'action de la voix humaine qui joue le rôle de moteur. C'est ainsi que les courants les plus puissants et les plus faibles que nous sachions produire ont tous la même origine : le travail mécanique.

L'importance de la production d'électricité par le travail mécanique a été mise en relief à l'Exposition d'électricité où une force de plus de 1500 chevaux était employée chaque soir à la production du courant électrique. La planche III représente une partie de la galerie des machines en mouvement. Une machine *Compound* actionne des générateurs électriques à courants alternatifs de Gramme et de Lambotte-Lachaussée.

Que de progrès accomplis depuis la première étincelle d'induction obtenue par Nobili en 1832 !

CHAPITRE IV

TRANSFORMATEURS ET ACCUMULATEURS ÉLECTRIQUES.

Tous les appareils que nous avons examinés jusqu'ici sont de véritables *générateurs* d'électricité, car ils engendrent le courant électrique en utilisant l'action chimique comme les piles à liquides, la chaleur comme les piles thermo-électriques ou le travail comme les machines électro-dynamiques.

Nous avons classé sous le nom un peu nouveau, mais parfaitement rationnel, de *transformateurs électriques*, des appareils dans lesquels l'électricité n'est plus produite directement, mais se *transforme* ou change ses propriétés. Nous ne saurions mieux les comparer qu'aux appareils *cinématiques* en mécanique.

Nous avons vu, en étudiant les qualités du courant, qu'une source donnée fournissait un certain *volume* ou *quantité* d'électricité à une certaine *pression* ou *tension*. Dans certaines applications, on peut avoir intérêt à augmenter l'une de ces propriétés aux dépens de l'autre, comme en mécanique on peut avoir intérêt à transformer la vitesse en force ou la force en vitesse à l'aide de poulies ou d'engrenages.

Ce sont les appareils qui permettent cette transformation que nous nommons *transformateurs électriques*.

On voit déjà que ces appareils peuvent se diviser en deux grandes classes, suivant qu'ils transforment l'électricité qu'ils

reçoivent pour lui donner de la quantité ou, au contraire, pour lui donner de la tension (1).

Dans la *première classe*, nous classerons les batteries secondaires de M. *Gaston Planté*, le condensateur voltaïque de M. *d'Arsonval*, les batteries de MM. *Houston* et *Thomson*, *Varley*, etc.

Dans la *seconde classe* figurent tout naturellement les bobines d'induction, la machine rhéostatique de M. Planté et les batteries secondaires qui permettent, sous certaines conditions que nous examinerons plus tard, d'accroître dans de très grandes proportions la tension de la source primitive.

Tous ces appareils ont cependant un caractère commun : ils reçoivent de l'électricité et rendent de l'électricité qu'ils transforment suivant leurs propriétés spéciales.

Tous les couples secondaires sont, en même temps que des transformateurs électriques, des *accumulateurs électriques*.

On peut les assimiler aux appareils qui servent, en mécanique, à l'*accumulation du travail* résultant de l'action des forces, tels que les *accumulateurs* hydrauliques, les réservoirs d'air comprimé, les ressorts si justement nommés *moteurs secondaires*, etc.

Les couples secondaires offrent, lorsqu'ils sont chargés, une provision de travail électrique disponible, que l'on peut dépenser à son gré, en un temps plus ou moins long : ils permettent d'obtenir pendant un temps très court des effets de tension et de quantité beaucoup plus grands que ceux de la source électrique primitive, ou, inversement, de produire des effets moins intenses, mais pendant un temps beaucoup plus long. Nous renvoyons, pour plus de détails sur ce sujet, au remarquable ouvrage de M. Gaston Planté, *Recherches sur l'électricité*.

Batteries secondaires de M. Planté. — M. Planté a été conduit à la réalisation de ses batteries par l'étude des courants secondaires développés au sein des piles. Les piles à deux li-

(1) On a imaginé depuis peu une nouvelle classe de *transformateurs* dont nous parlerons à propos de la distribution de l'électricité et qui changent la *nature* du courant.

quides et à courant constant avaient été imaginées par Becquerel pour neutraliser la polarisation.

M. Planté, se plaçant à un autre point de vue, chercha à recueillir les courants secondaires et à les mettre à profit pour *accumuler* la force de la pile voltaïque. Voyons, avec lui, comment il fut conduit, par des modifications successives, à adopter la forme de batterie secondaire qui est employée aujourd'hui :

« Nous avions trouvé que la force électro-motrice secondaire d'un voltamètre à lames de plomb dans l'eau acidulée par l'acide sulfurique était plus énergique et plus persistante que celle de tous les autres métaux, et qu'elle dépassait même de moitié celle de l'élément voltaïque le plus énergique connu, celui de Grove ou de Bunsen.



Fig. 41. — Élément Planté (1860).

« Avec une telle force électro-motrice, il ne s'agissait plus, pour constituer un élément secondaire d'une grande intensité, que de lui donner une très faible résistance, d'accroître le plus possible sa surface. Cela devenait d'autant plus facile que les deux lames nécessaires pour le former devaient être de même nature et d'un métal extrêmement flexible et malléable comme le plomb.

« C'est ainsi que nous fûmes conduit à construire, en 1860, un élément secondaire de grande intensité, en employant une disposition analogue à celle qu'Offershaus et Hare avaient employée pour la pile voltaïque proprement dite, c'est-à-dire en enroulant en spirale deux longues et larges lames de plomb, séparées l'une de l'autre par une toile grossière, et les plongeant ensuite dans un bocal plein d'eau acidulée au $\frac{1}{10}$ par l'acide sulfurique. La figure 41 montre la disposition d'un couple secondaire de cette nature. »

La toile était un inconvénient, car elle introduisait une ré-

sistance additionnelle et s'altérait à la longue. M. Planté employa alors des batteries à lames plates parallèles, séparées par des baguettes isolantes, placées dans des cuvettes en gutta-percha. Mais les vases en gutta-percha subissaient, avec le temps, un retrait ayant pour effet de rapprocher les lames de plomb en les cintrant et d'occasionner des contacts. L'opacité de cette substance empêchait, en outre, de voir les phénomènes qui se passent à l'intérieur des couples secondaires et qu'il importe de suivre pendant la charge. Ici nous rendons la parole à M. Planté :

« Nous sommes donc revenu à une disposition à peu près semblable à la première que nous avons décrite, mais en modifiant toutefois le mode de séparation des lames de plomb. Nous avons séparé ces lames, non plus par une toile grossière, mais par des bandes étroites de caoutchouc présentant l'avantage de ne point s'altérer dans l'eau acidulée et de ne couvrir qu'une très mince partie de la surface des électrodes.

Fabrication des piles secondaires de M. Gaston Planté. — « Deux paires de bandes de caoutchouc d'un centimètre environ de largeur, sur un demi-centimètre d'épaisseur, sont nécessaires pour empêcher les lames de se toucher réciproquement. Les lamelles qui forment leur prolongement sont taillées aux extrémités opposées des lames, pour mieux éviter les causes de contact et pour égaliser la distribution du courant primaire sur les surfaces des électrodes, en éloignant l'un de l'autre les deux points par lesquels débouchent l'électricité positive et l'électricité négative dans le couple secondaire. Toutefois cette disposition n'est pas indispensable, si les lames de plomb sont enroulées bien uniformément l'une autour de l'autre. L'action chimique du courant primaire se distribue alors également sur toute la surface du couple secondaire, quand même les deux pôles de la pile y déboucheraient très près l'un de l'autre.

« On enroule donc les *lames* de plomb, ainsi séparées par deux ou trois paires de bandes de caoutchouc, autour d'un cylindre en bois ou en métal (fig. 43).

« Il convient de placer deux petites bandes de caoutchouc transversales de la longueur du cylindre, devant les extrémités des bandes longitudinales, lorsqu'on commence à enrouler la première spire, afin de bien séparer les bords des deux lames de plomb qui pourraient tendre à se toucher.

« L'enroulement une fois effectué, on enlève, avec précaution,

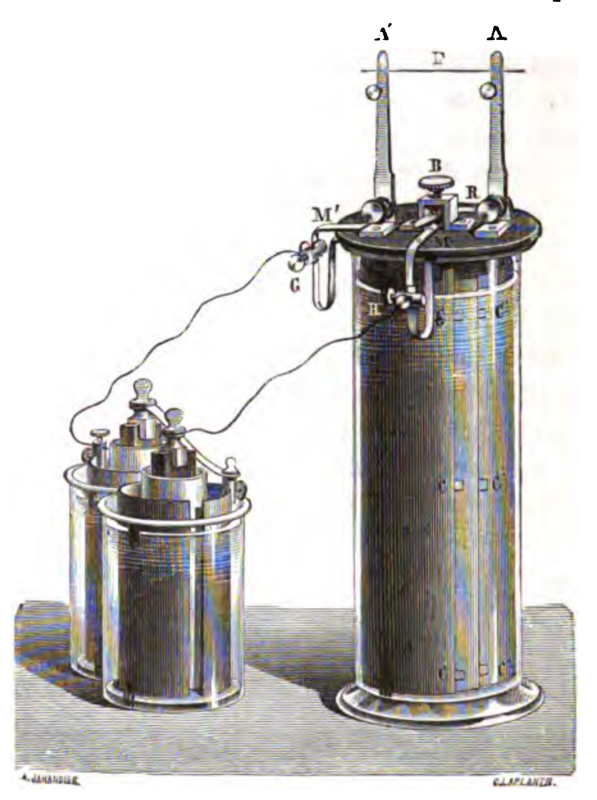


Fig. 42. — Pile secondaire de M. Planté chargée par deux éléments de Bunsen.

le rouleau intérieur, et, pour donner plus de stabilité au système, on maintient les spires à leur place, d'une manière définitive, à l'aide de petits croisillons en gutta-percha ramollis par la chaleur.

« Le couple ainsi construit est introduit ensuite dans un vase cylindrique en verre, et assujetti, à l'intérieur, par de petites

cales en gutta-percha. Le vase est rempli d'eau acidulée au $\frac{1}{10}$ par l'acide sulfurique.

« La figure 42 représente un couple ordinaire d'assez grande dimension, construit comme nous venons de le dire, et indique aussi la disposition que nous avons donnée au système des communications pour charger le couple ou le décharger, et montrer les effets qu'il peut produire.

« Le vase en verre contenant les lames de plomb immergées dans l'eau acidulée est recouvert d'un disque en caoutchouc durci qui porte les pièces métalliques destinées à former le cir-

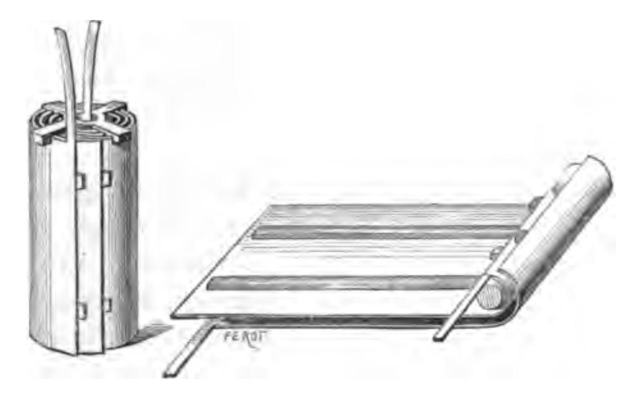


Fig. 43. — Fabrication des accumulateurs de M. Gaston Planté.

cuit secondaire, quand le couple est chargé. Les extrémités des deux lames de plomb communiquent, à l'aide des pinces G et H, à la fois avec une pile primaire formée de deux éléments de Bunsen de petite dimension et avec les lamelles de cuivre MM'. La lamelle M est disposée au-dessous d'une autre lamelle de cuivre R, dont l'extrémité prolongée, formant ressort, peut être abaissée et pressée par le bouton B, et la lamelle M se trouve alors en communication avec la pince A. La lamelle M', d'autre part, est en communication constante avec la pince A', et, entre les branches de ces deux pinces, sont placés les fils métalliques destinés à être rougis ou fondus par le courant secondaire. On peut encore faire aboutir à ces deux pinces les fils

provenant de tout autre appareil dans lequel on veut faire passer le même courant.

« Ce système de communications, installé de la manière la plus simple possible pour tenir sur le couvercle d'un vase, ne rompt pas le courant primaire, quand on ferme le circuit secondaire. Si donc on veut essayer l'effet du couple secondaire seul, on le sépare de la pile primaire en détachant les fils G et H, et on serre ensuite le bouton B. Mais si on laisse ces fils en communication avec le couple secondaire, lorsqu'on veut le décharger en serrant le bouton, cela n'a aucun inconvénient; l'appareil n'en fonctionne pas moins; ses effets se trouvent même légèrement augmentés par l'action de la pile primaire qui s'ajoute à celle du couple secondaire, qui sont en opposition pendant la charge, se trouvent associés en *quantité* lors de la décharge. »

Action chimique produite dans les couples secondaires à lames de plomb. — Lorsqu'un couple secondaire de grande surface est neuf, et qu'on vient à le faire traverser par le courant de deux couples de Bunsen, le gaz oxygène apparaît presque immédiatement sur la lame, et celle-ci ne tarde pas à être recouverte d'une couche très mince de peroxyde de plomb.

D'un autre côté, l'hydrogène, après avoir réduit la faible couche d'oxyde dont le plomb peut être couvert par l'exposition à l'air, ne tarde pas à apparaître, et si, au bout de quelques instants, on essaie le courant secondaire produit par l'appareil, on constate qu'il est déjà très énergique par la vivacité de l'étincelle produite, lorsqu'on ferme et qu'on rompt aussitôt le circuit secondaire, avec un conducteur en cuivre peu résistant. Mais le courant ainsi obtenu est de très courte durée.

Pendant la fermeture du circuit secondaire, l'oxygène, se portant sur la lame qui était négative lors du passage du courant, a peroxydé légèrement cette lame, en même temps que le peroxyde formé sur l'autre lame lors du passage du courant principal, se réduisait par l'hydrogène. On a donc, après une pre-

mière expérience, deux lames recouvertes de couches minces d'oxyde et de métal réduit qui faciliteront l'action ultérieure du courant principal sur le couple secondaire.

Si l'on considère d'abord la lame de plomb qui était négative lors du passage du courant principal pour la première fois, cette lame est, comme on vient de le voir, recouverte d'une couche d'oxyde après le passage du courant secondaire. Il en résulte que si l'on fait de nouveau passer le courant principal, les premières portions d'hydrogène seront consacrées à réduire cette couche d'oxyde, au lieu de la couche plus faible résultant seulement de l'exposition à l'air, comme cela avait lieu précédemment. Par suite, un retard plus grand que la première fois se produira dans l'apparition de l'hydrogène à la surface de cette lame, car ce gaz ne commencera à se dégager que lorsque l'oxyde sera parfaitement réduit à l'état de plomb pulvérulent ou très divisé à la surface de cette lame.

Les premières portions d'oxygène qui tendent à se dégager à la surface rencontrent, cette fois, une couche de peroxyde réduit ou de plomb métallique divisé, sur laquelle ce gaz a plus de prise, s'il est permis de parler ainsi, que sur la lame de plomb servant pour la première fois; le gaz est plus facilement absorbé, et l'on commence aussi à constater un retard dans l'apparition de l'oxygène sur cette lame, retard qui correspond au temps nécessaire pour oxyder de nouveau la couche de plomb réduit à la surface.

Quand on ferme de nouveau le circuit secondaire, les phénomènes précédemment décrits se reproduisent, et l'on conçoit que, lorsqu'on aura renouvelé ces opérations un très grand nombre de fois, les surfaces de plomb du couple secondaire se trouveront dans un état plus favorable pour l'oxydation ou la réduction; les couches d'oxyde alternativement formées ou réduites deviendront plus épaisses, et les effets secondaires qui en résultent présenteront plus de durée et d'intensité.

C'est, en effet, ce qu'on observe; plus un couple secondaire reçoit l'action d'un courant primaire et fonctionne lui-même

après cette action, plus est longue la durée du courant secondaire.

La formation consiste en une sorte de *tannage* électro-chimique. Tout le travail des piles s'accumule sous forme d'oxydation du plomb, d'une part, et, d'autre part, de réduction du plomb oxydé produit par la fermeture antérieure du courant secondaire.

Lorsque les gaz commencent à se dégager, dans un couple bien *formé*, on est averti que la pile n'effectue plus sensiblement de travail utile à la production du courant secondaire.

Puissance et durée de la décharge des couples secondaires. — Un couple secondaire bien chargé peut fournir une décharge qui dépend de la grandeur des lames, de l'épaisseur des produits et enfin de la résistance extérieure du circuit.

La décharge est très constante tant que la pile renferme de l'électricité emmaganisée sous forme de travail chimique.

De même qu'un vase très large contenant une grande quantité de liquide, sous une très faible hauteur, fournirait pendant longtemps, par un petit orifice, un écoulement à peu près constant et cessant d'une manière rapide, dès que le liquide arrive au-dessous du niveau de l'orifice, de même un couple secondaire de grande surface, soit qu'il rougisse un fil métallique, soit qu'il produise une déviation galvanométrique, n'accuse une diminution d'intensité que quelques instants avant de cesser complètement de fournir de l'électricité.

Le fait est frappant quand on décharge le courant secondaire en lui faisant traverser un fil fin de platine. L'incandescence se maintient longtemps uniforme et cesse brusquement, dès que la provision de travail chimique, accumulée dans le couple, est épuisée.

La force électro-motrice d'un couple secondaire bien formé atteint environ deux volts et demi, ce qui explique pourquoi il faut au moins trois éléments Daniell ou deux éléments Bunsen pour le charger complètement.

La faible résistance intérieure des couples, qui varie entre un vingtième et un cinquième de ohm, explique la quantité fournie par ces appareils. On peut aussi charger les éléments Planté avec des machines Gramme de laboratoire; mais dans ce cas il convient que la vitesse ne descende pas au-dessous d'une certaine valeur, pour laquelle la pile se déchargerait inutilement dans la machine. Pour remédier à cet inconvénient, nous avons combiné un conjoncteur et disjoncteur automatique qui retire la batterie secondaire du circuit dès que la force électromotrice devient trop faible pour la charger, et la replace dans ce circuit dès que la force électro-motrice est devenue assez grande pour effectuer le chargement. (Voir *la Lumière électrique* du 15 juin 1880.)

Les couples secondaires peuvent conserver longtemps la charge accumulée. Ainsi un couple secondaire bien formé et bien chargé peut encore rougir un fil de platine de un demi-millimètre de diamètre, pendant quelques minutes, de deux ou trois semaines après avoir été chargé.

Cet effet a même été obtenu par M. Planté, avec des couples exceptionnellement bien formés, plus d'un mois après les avoir soumis à l'action primaire.

M. Planté a mesuré le rapport du travail électrique *restitué* par la décharge à celui du travail électrique *dépensé* par la charge en décomposant du sulfate de cuivre dans un voltamètre. Le *rendement* atteint 88 à 89 p. 100; le couple secondaire est donc un accumulateur assez parfait du travail de la pile voltaïque.

Batteries d'emmagasinement de MM. H. Houston et Thomson. — Dans l'appareil imaginé par ces deux savants américains, le phénomène secondaire sur lequel est fondé le principe d'accumulation n'est autre chose que la décomposition chimique des sels, le sulfate de zinc dans le cas particulier, par le courant électrique.

La figure 44 représente le principe de leur batterie d'emmagasinement et la figure 45 une série d'éléments disposés en ten-

sion pour produire des effets plus intenses. Dans la figure 44, B est une plaque de cuivre reliée à la borne *b*, et C une plaque de charbon reliée à la borne *c*. Le vase A, qui renferme les deux plaques, est rempli d'une solution de sulfate de zinc ; E est un diaphragme poreux qui sépare les deux plaques.

Si un courant venant d'une machine dynamo-électrique traverse l'appareil dans le sens *bc*, le sulfate de zinc sera décomposé, et du zinc métallique se déposera sur la plaque de charbon C, tandis qu'il se formera, à la partie supérieure du vase A, une solution concentrée de sulfate de cuivre. La durée du dépôt ou de la charge n'est limitée que par la quantité de sulfate de

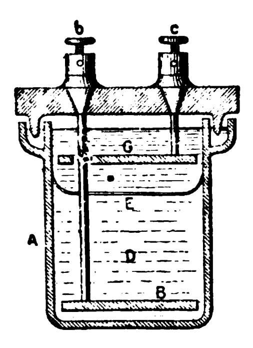


Fig. 44. — Élément simple.

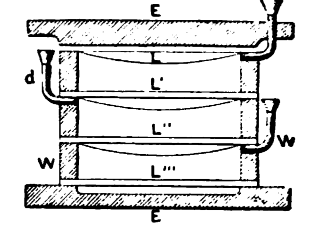


Fig. 45. — Série d'éléments.

Batteries d'emmagasinement de l'électricité de MM. Houston et Thomson.

zinc que renferme le vase et par l'épaisseur de la plaque de cuivre B. On a donc constitué un *élément-gravité*, analogue à l'élément Callaud, susceptible de fournir un courant électrique tant que la plaque de charbon C est recouverte de zinc.

Condensateur voltaïque de M. d'Arsonval. — Au moment même où MM. Houston et Thomson combinaient leur batterie accumulatrice en Amérique (octobre 1879), M. *d'Arsonval*, préparateur au Collège de France, étudiait la même question, dans le but d'augmenter la charge accumulée dans la pile secondaire de M. Planté.

Dans la note présentée à l'Académie des sciences le 26 janvier 1880, M. d'Arsonval décrit sou couple secondaire, qui se

compose d'une lame de zinc et d'une lame de charbon placées dans un vase poreux rempli de grenaille de plomb ou de cendrée, le tout baigné par une solution concentrée de sulfate de zinc.

Si on charge le couple par un courant allant du charbon au zinc, le sel de zinc est électrolysé : le zinc se dépose sur la lame de zinc, l'oxygène vient former sur la cendrée de plomb du peroxyde de plomb, l'acide sulfurique reste à l'état libre. Le dépôt du métal oxydable, le zinc, n'est donc plus limité, et l'oxygène peut s'accumuler en plus grande quantité, sous la forme de peroxyde de plomb. On peut substituer au plomb du manganèse, de l'argent et du cuivre, qui donnent aussi de bons résultats; mais aucun d'eux n'approche du peroxyde de plomb, adopté par M. Planté.

Pile secondaire de M. Faure. — Il s'est fait quelque bruit, au commencement de l'année 1881, autour d'un perfectionnement apporté à la pile secondaire de M. Gaston Planté par M. Camille Faure. M. Faure a voulu augmenter la capacité de l'accumulateur de M. Planté et supprimer le travail long et fastidieux de la formation. Il a recouvert à cet effet les deux électrodes en plomb d'une couche de minium maintenue par une feuille de parchemin, une feuille de feutre et des rivets en plomb. Le reste de la préparation de l'élément est identique à celui de M. Planté. Après une période de formation relativement restreinte, — cent heures environ, — on constate que l'une des couches de minium est passée entièrement à l'état de peroxyde de plomb et que l'autre, sur l'autre électrode, est devenue du plomb réduit. M. Faure, pour alléger le couple, supprime le vase en verre et le remplace par un vase de plomb dont la surface intérieure fait partie de l'une des électrodes.

La quantité d'électricité emmagasinée dépend, toutes choses égales d'ailleurs, de la quantité de peroxyde et de plomb réduit *utiles* déposés sur les lames. Il semblerait, *à priori*, que la pile Faure doit avoir une capacité d'accumulation incomparablement plus grande, à poids égal, que celle de la pile Planté.

En fait, rien n'est encore moins prouvé.

Des mesures directes faites sur les piles Planté nous ont donné une énergie *disponible dans le circuit extérieur* de 1750 kilogrammètres par kilogramme. L'on annonce, bien qu'il ne nous ait pas encore été possible de vérifier le fait, les piles Faure n'étant pas encore dans le commerce, que l'on peut produire un cheval-vapeur pendant une heure avec 75 kilogrammes d'accumulateurs Faure. En acceptant ces chiffres, la capacité d'emmagasinement des éléments Planté aurait été un peu plus que doublée par le perfectionnement de M. Faure. Nous voilà bien loin du chiffre de *quarante* fois donné à l'origine par M. Reynier. Il faudra, croyons-nous, attendre une comparaison exacte et impartiale, qu'il n'a pas été possible de faire jusqu'ici, pour porter un jugement.

La question est d'ailleurs à l'étude de tous côtés. Les brevets d'accumulateurs se prennent par douzaines : les accumulateurs sont *à la mode*. A propos de la distribution de l'électricité, nous examinerons les services qu'on est en droit d'en attendre dans certains cas spéciaux.

Bobines d'induction. — Nous n'avons pas à faire ici l'historique de ces appareils qui ont rendu célèbre le nom de *Ruhmkorff* et ont valu à ce savant et modeste constructeur un grand prix de 50,000 francs décerné par l'Académie des sciences.

Nous les signalons seulement ici parce qu'elles entrent bien dans notre classification. Une bobine d'induction n'est autre chose qu'un transformateur électrique recevant de l'électricité de quantité, et la transformant en électricité de haute tension. Ces courants sont caractérisés par cette haute tension, d'une part, et par leur faible intensité ou quantité, d'autre part.

On sait toutes les applications qu'a reçues la bobine de Ruhmkorff pour l'inflammation des mines, des torpilles, les applications médicales, l'éclairage des tubes de Geissler, les expériences de physique, etc., etc.

On ne peut donc plus considérer cet intéressant appareil comme une application *nouvelle* de l'électricité, mais nous don-

nerons néanmoins la description d'une bobine d'induction remar-

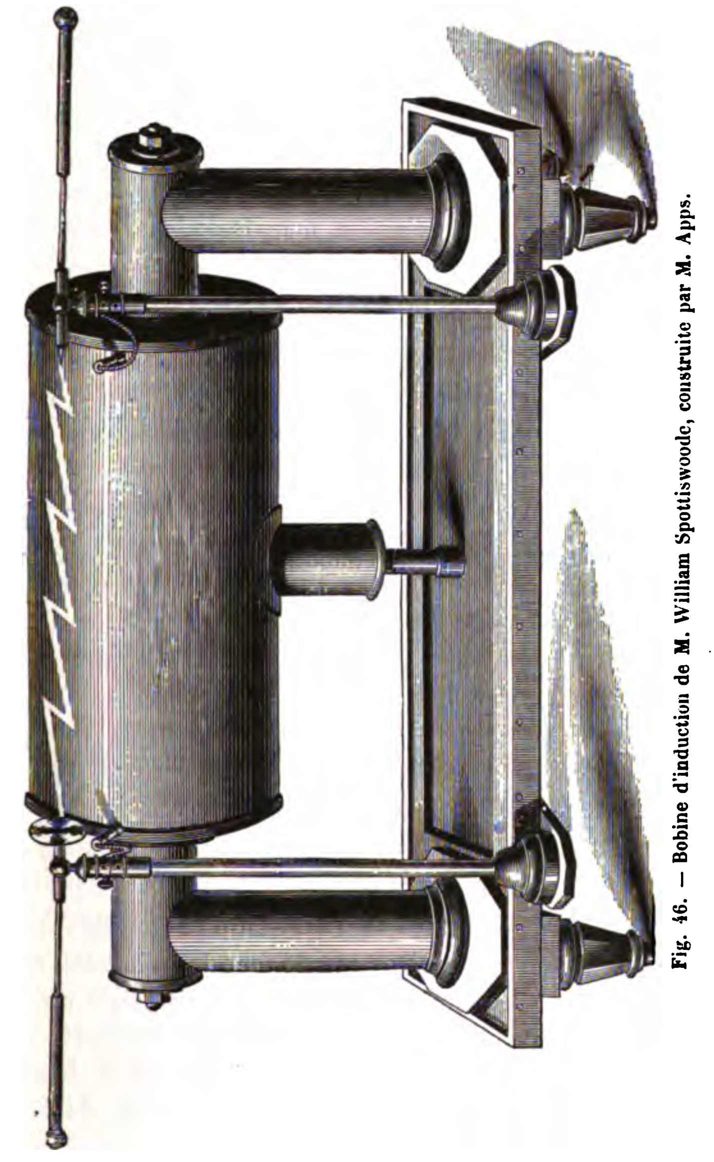


Fig. 46. — Bobine d'induction de M. William Spottiswoode, construite par M. Apps.

quable par les effets qu'elle produit et qui peut être considérée comme la plus puissante qui ait été construite jusqu'à ce jour.

Bobine d'induction de M. W. Spottiswoode. — M. *William Spottiswoode,* le président actuel de la Société Royale de Londres, a fait construire par M. Apps une bobine d'induction d'une puissance remarquable et qui a fourni des étincelles dont la longueur atteint jusqu'à 110 centimètres. Le bruit produit par chaque étincelle est comparable à un coup de pistolet.

L'aspect général de l'instrument est représenté figure 46. La bobine est portée par deux piliers massifs de bois, recouverts de gutta-percha et paraffinés à leurs deux extrémités. Outre ces deux supports, on en voit un troisième au milieu et dont la hauteur peut être réglée au moyen d'une vis, pour résister à la flexion de la pièce principale.

La bobine peut fonctionner avec deux circuits inducteurs qu'on utilise à tour de rôle.

Le premier, qui sert aux longues étincelles et en réalité à la plupart des expériences, a un noyau composé d'un faisceau de fils de fer de $\frac{8}{10}$ de millimètre chacun, et formant ensemble un cylindre de $1^m,10$ de longueur et de 9 centimètres de diamètre. Il pèse plus de 30 kilogrammes. Le fil de cuivre qui constitue l'inducteur a une longueur de 600 mètres, un diamètre de 2,23 millimètres, une conductibilité de 0,93, une résistance totale de 2,3 ohms, et un poids de 25 kilogrammes à peu près. Il est enroulé sur le faisceau de fils de fer, en 1344 spires disposées en 6 couches et se présente enfin sous la forme d'un cylindre de $1^m,06$ centimètres, et d'un diamètre extérieur de 12 centimètres.

L'autre système inducteur, qui est destiné à fonctionner avec des piles de plus grande surface et à donner des étincelles courtes et nourries, pour des expériences de spectroscopie, a un noyau de fils de fer de $\frac{8}{10}$ de millimètre comme les précédents, réunis ensemble et formant un cylindre de $1^m,11$ de long et de 97 millimètres de diamètre. Le poids de ce noyau est de 41 kilogrammes. Le fil de cuivre est le même que dans le premier circuit inducteur, mais le conducteur qui a 459 mètres de long, est composé de deux fils parallèles. Il est divisé en trois sections

de chacune deux couches; leurs résistances sont respectivement 0,181, 0,211 et 0,231 ohms. La longueur du cylindre ainsi composé est de $1^m,01$, et son diamètre de 14 centimètres. Le poids de ce fil est de 38 kilogrammes.

Le circuit secondaire se compose de 450 kilomètres de fil formant un cylindre de 95 centimètres de longueur, de 50 centimètres de diamètre extérieur et 24 centimètres de diamètre intérieur. La conductibilité de ce fil est de 94 p. 100 et sa résistance totale de 110200 ohms. Il est distribué en quatre sections; chacune de ces sections est composée elle-même de disques plats qui ont l'épaisseur d'environ 200 couches du fil dont ils sont formés. Enfin le nombre total de spires du circuit induit s'élève à 341850.

La grande longueur de fil nécessaire se comprend, si on songe que les spires extérieures ont près de 1 mètre et demi. On admet que l'étincelle croît plutôt avec le nombre de spires qu'avec sa longueur, à la condition qu'un bon isolement soit assuré dans toutes les parties. Pour marcher sûrement à un résultat satisfaisant, on essaya chaque disque séparément avec grand soin ; on les essaya de nouveau en séries, et on nota tous les résultats fournis. Comme épreuve suprême, on fit agir sur la bobine 70 éléments de Grove sans que l'isolement fût endommagé.

Le condensateur approprié à cette bobine est beaucoup moins grand qu'on n'eût pu croire. Après de nombreuses expériences, on s'arrêta à une dimension employée par M. Apps pour des bobines destinées à donner 25 centimètres d'étincelle. Ces condensateurs sont formés de 126 feuilles d'étain de 45 — 21 centimètres, séparées par une double épaisseur de papier verni, mesurant au total $0^{mm},28$.

Voici quelques-uns des effets obtenus avec ce puissant appareil (on se servait du premier système inducteur) :

Avec 5 grands couples de Grove, l'étincelle atteint 71 centimètres. Avec 10 couples, 89 centimètres. Avec 30 couples, 106 1/2.

On arriva même dans quelques cas à 109 ou 110 centimètres.

On sait que les bobines d'induction ou *inductoriums*, comme on les appelle en Angleterre, donnent deux courants d'induction, l'un au moment de la fermeture du circuit inducteur, l'autre au moment de la rupture. Le premier ne présente pas de tension, et c'est le second qui fournit les étincelles. Les expériences faites avec le bel appareil qui nous occupe, ont démontré que la tension du courant induit (de fermeture) peut atteindre une valeur notable; on en a obtenu des étincelles qui ont atteint 31 millimètres. La longueur de l'étincelle du courant de fermeture dépend naturellement de l'intensité du courant inducteur et augmente avec elle. On a pu également percer des blocs de flint-glass de 75 millimètres d'épaisseur, sans même faire usage des piles qui donnent le maximum d'effet.

Courants continus de haute tension. — Les bobines d'induction fournissent un courant de très haute tension, mais intermittent et alternatif, ou plus exactement fournissent deux espèces de courant parfaitement distinctes, le courant de *fermeture*, ayant peu de tension et beaucoup de quantité relative, suivi d'un courant induit de *rupture* ayant une tension énorme, mais beaucoup moins de quantité.

Il peut être utile, dans certaines expériences, d'avoir un courant continu de haute tension.

M. *Warren de la Rue* a résolu le problème en employant 11 000 éléments de sa pile à chlorure d'argent que nous avons décrite page 20. Mais la résistance de ces éléments est assez grande et, d'autre part, 11 000 éléments occupent un certain espace et représentent une somme assez considérable.

M. *Gaston Planté*, qui a fait une série de recherches du plus grand intérêt sur les courants de haute tension, a employé des batteries secondaires de 200 à 800 éléments, pouvant obtenir ainsi un effet équivalent, pendant les premiers instants, à celui de 300 à 1 200 éléments de Bunsen. La tension de chaque couple étant toujours supérieure à *deux volts* (elle atteint 2,8 volts au commencement de la décharge), on voit que les 800 couples secondaires peuvent fournir, dans un très petit volume, une ten-

sion supérieure à celle de 2000 éléments Daniell, avec une quantité beaucoup plus grande. Il suffit de *deux couples* moyens de Bunsen pour les charger par groupes en quantité, puis, à l'aide d'un commutateur spécial, on les groupe en tension pour effectuer la décharge. On dépense en quelques secondes le travail de plusieurs heures des deux éléments Bunsen, ce qui explique la puissance des effets.

Ces expériences présentent le plus grand danger, et il faut manœuvrer les appareils avec beaucoup de précautions. M. Planté reçut un jour la décharge de 600 couples qui produisit une commotion extrêmement forte et *l'impression d'un feu brûlant traversant* tout le corps, *en remontant jusqu'à la nuque.* Toutefois cet accident n'eut heureusement aucune suite fâcheuse. Mais il n'en eût pas été peut-être de même, ajoute M. Planté, si les 800 couples secondaires avaient été alors en fonction.

Machine rhéostatique de M. Planté. — Nous avons vu que M. Planté avait obtenu des tensions de plus de deux mille volts avec huit cents éléments secondaires. Ces effets ont encore été augmentés et la *machine rhéostatique* a permis de *transformer* plus complètement la force de la pile voltaïque et d'obtenir une tension équivalente à celle des appareils de l'électricité statique.

Voici comment M. Planté a été amené à imaginer cet intéressant transformateur électrique. Nous lui rendons encore une fois la parole :

« Après avoir constaté combien il était facile de charger rapidement, avec la batterie de 800 couples, un condensateur à lame isolante suffisamment mince, en verre, mica, gutta-percha, paraffine, etc., j'ai réuni un certain nombre de condensateurs formés, de préférence, avec du mica recouvert de feuilles d'étain, et je les ai disposés comme les couples de la batterie secondaire elle-même, de manière à pouvoir être aisément chargés en *quantité*, et déchargés en *tension*.

« Toutes les pièces de l'appareil ont dû être naturellement isolées avec soin. Le commutateur est formé d'un long cylindre en caoutchouc durci (fig. 47), muni de bandes métalliques longitudi-

nales, destinées à réunir les condensateurs en surface, et traversé en même temps par des fils de cuivre, coudés à leurs extrémités,

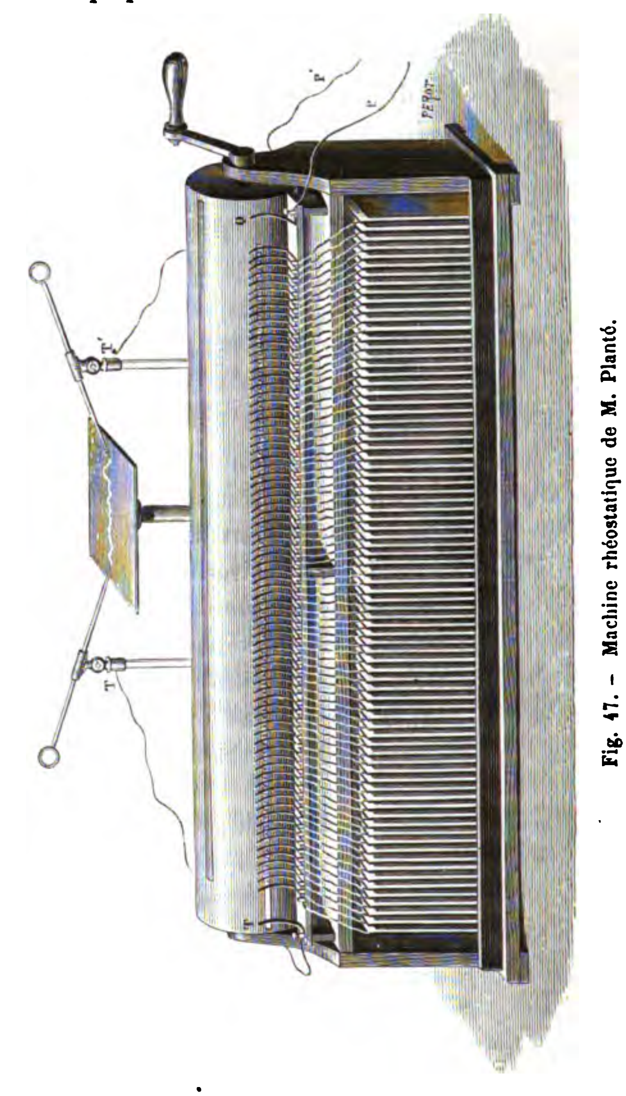


Fig. 47. — Machine rhéostatique de M. Planté.

ayant pour objet d'associer les condensateurs en tension. Des lamelles ou des fils métalliques façonnés en ressort sont mis en relation avec les deux armatures de chaque condensateur et fixés,

sur une plaque en ébonite, de chaque côté du cylindre qui peut être animé d'un mouvement de rotation.

« Si l'on fait communiquer les deux bornes de l'appareil avec la batterie de 800 couples, même plusieurs jours après l'avoir chargée avec deux éléments de Bunsen, et si l'on met le commutateur en rotation, on obtient, entre les branches de l'excitateur auxquelles aboutissent les armatures des condensateurs extrêmes, une série d'étincelles tout à fait semblables à celles que donnent les machines électriques munies de condensateurs.

« En employant un appareil formé de quatre-vingts condensateurs, ayant chacun 3 décimètres carrés de surface, j'ai obtenu des étincelles de 12 centimètres de longueur, allant même jusqu'à 15 centimètres lorsqu'elles éclatent au-dessus d'une surface isolante saupoudrée de fleur de soufre (fig. 47).

En ne faisant agir que 200 couples, on a des étincelles de 8 millimètres, et l'on pourra, sans doute, en diminuant encore l'épaisseur des lames isolantes et en multipliant le nombre des condensateurs, obtenir des effets avec une source d'électricité de moindre tension.

« Il y a lieu de remarquer que les décharges d'électricité statique, fournies par l'appareil sont toujours dans le même sens, et que la perte de force résultant de la transformation doit être moindre que dans les appareils d'induction, car le circuit voltaïque n'étant pas fermé un seul instant sur lui-même, il n'y a pas conversion d'une partie du courant en effet calorique. On peut maintenir longtemps l'appareil en rotation et produire un nombre considérable de décharges, sans que la batterie secondaire paraisse sensiblement affaiblie.

« Cela vient de ce que chaque décharge n'enlève qu'une quantité très minime d'électricité, et que le circuit de la batterie n'est pas fermé par un corps conducteur. L'électricité de la source se répand simplement sur les surfaces polaires offertes par tous les condensateurs, au fur et à mesure qu'on les décharge. Mais cette émission constamment répétée doit finir néanmoins par enlever une certaine quantité d'électricité, et, quand l'instrument est

chargé par une batterie secondaire, on finit par épuiser à la longue, sous forme d'effets statiques, la quantité limitée d'électricité que peut fournir le courant de la batterie.

« On réalise donc ainsi, par une autre voie que celle de l'induction proprement dite, à l'aide d'un simple effet d'influence statique sans cesse renouvelé, la transformation de l'électricité dynamique, de sorte que cet appareil peut être désigné sous le nom de *machine rhéostatique.* »

Après avoir passé en revue les différentes méthodes par lesquelles l'intelligence de l'homme engendre et transforme les courants électriques, nous allons examiner quelques-unes des applications intéressantes dans lesquelles il a su dompter cette force mystérieuse et lui faire accomplir des merveilles.

DEUXIÈME PARTIE

L'ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE.

Bien que l'éclairage électrique ne soit pas celle des applications de l'électricité qui ait reçu jusqu'ici le plus grand développement, c'est elle qui doit cependant figurer au premier rang, autant au point de vue de son avenir que de son ancienneté.

C'est en effet en 1813 que le célèbre physicien anglais *Humphry Davy* produisit l'arc voltaïque pour la première fois, avec une pile de 2000 éléments zinc et cuivre ; mais ce n'est qu'en 1842 que des expériences faites par MM. *Deleuil* et *Archereau* firent pressentir la possibilité de son emploi comme moyen d'éclairage public.

Ajoutons encore qu'à cette époque on ne connaissait que les piles hydro-électriques comme sources d'électricité. Les machines électro-dynamiques étaient encore dans l'enfance et les moyens de régulariser la lumière plus que primitifs.

En 1857, les machines de l'*Alliance*, perfectionnées par Van Malderen, montrèrent que la lumière électrique pouvait être produite avantageusement dans certains cas spéciaux, et leur application à l'éclairage des phares de la Hève, dès l'année 1863, fit entrer la lumière électrique pour la première fois dans la pratique courante.

L'invention de la machine de Gramme en 1870 donna un

nouvel essor à l'éclairage électrique qui n'avait reçu jusqu'à cette époque qu'un nombre restreint d'applications, et enfin la découverte de M. Jablochkoff, en 1876, acheva de mettre à l'ordre du jour un éclairage nouveau destiné, non pas à détrôner le gaz, comme l'affirment certaines personnes intéressées et exclusives, mais à le remplacer dans un grand nombre d'applications où la lumière électrique présente des qualités de nature à en dicter l'emploi, de préférence à tous les autres éclairages artificiels.

Modes de production de la lumière électrique. — Tout éclairage électrique comprend deux parties parfaitement distinctes :

1° Le générateur électrique ;

2° La lampe électrique.

Après avoir étudié les différents procédés employés à la production de la lumière, il nous sera plus facile d'apprécier la valeur des différentes sources d'électricité par rapport aux appareils qu'elles doivent alimenter ; tous les générateurs électriques actuellement en usage ont d'ailleurs été décrits dans la première partie de cet ouvrage à laquelle nous renverrons le lecteur chaque fois qu'il sera question de l'un d'eux.

Le principe qui préside à la production de la lumière dans un éclairage *quelconque*, huile, pétrole, gaz ou électricité, est le suivant : Porter un corps solide, liquide ou gazeux à une haute température, la quantité de lumière produite étant d'autant plus grande que la température du corps est plus élevée.

Dans tous les éclairages, l'élévation de température est produite par la combustion de l'huile, du pétrole ou du gaz qui alimente le foyer lumineux. Dans la lumière électrique, la haute température du point lumineux est produite par le courant traversant une résistance électrique et se transformant en chaleur *dans un espace très restreint*, *en échauffant un nombre relativement très faible de molécules*. Lorsque le courant électrique chauffe un conducteur gazeux, la lumière ainsi produite se nomme *arc voltaïque*. Cet arc voltaïque cependant ne devient très lumineux qu'à la condition que le conducteur gazeux renfer-

me des particules détachées des électrodes qui, élevées à une très haute température, lui communiquent cet éclat éblouissant qui le caractérise. On emploie dans ce but des conducteurs en chanbon de cornue ou en charbon aggloméré, comme nous le verrons plus tard. La combustion de ce charbon, en ajoutant la chaleur qu'elle produit à celle du courant, favorise la production et le maintien de cette haute température et contribue, dans une assez grande mesure, à l'éclat de la lumière.

Lorsqu'on emploie un conducteur solide, de faible conductibilité, le courant l'échauffe, le rend lumineux, et la lumière ainsi produite est de la lumière *par incandescence*.

De là résultent deux grandes divisions dans la production de la lumière électrique suivant qu'on emploie l'un ou l'autre des procédés que nous allons examiner successivement.

ARC VOLTAIQUE.

Quelle que soit la tension de la source électrique employée, elle est toujours insuffisante pour faire jaillir la lumière entre les deux électrodes si elles n'ont pas été préalablement amenées au contact. A ce moment, le gaz qui entoure les électrodes est échauffé par le courant, il devient plus conducteur, et on peut alors les écarter un peu, tout en maintenant le passage du courant à travers le conducteur gazeux.

Avec les courants de très haute tension, comme ceux fournis par les machines de Holz et les bobines d'induction, la décharge peut se produire entre les électrodes séparées par un certain intervalle et produire de la *lumière électrique* dans le sens absolu du mot, mais non pas un *éclairage*.

Dans un intéressant *Aperçu historique sur la lumière produite par l'électricité*, publié par le journal *la Nature* en avril 1878, M. Antoine Bréguet fait remonter à *Otto de Guericke* (1602-1688), bourgmestre de Magdebourg, la première *lueur* produite par l'électricité.

Dans un mémoire lu à la Société Royale de Londres, le 6 février 1746, le docteur Watson fit remarquer que les étincelles électriques paraissaient de couleurs différentes selon la nature des substances d'où elles jaillissent, que le feu paraissait beaucoup plus rouge sortant des corps bruts, comme le fer rouillé, le cuivre oxydé, etc., que des corps à surface nette.

Ce fut Watson qui produisit en réalité, le premier, un véritable *éclairage* à l'électricité, puisqu'avec quatre de ses appareils il donnait naissance à des jets de flamme si grands et si rapprochés que, dans une chambre obscure, on apercevait distinctement les visages de treize personnes assistant à l'expérience.

Toutes ces expériences étaient faites avec l'électricité dite *statique* fournie par les machines à frottement. Il faut arriver jusqu'à la découverte de la pile faite par Volta pour obtenir la réalisation d'une lumière électrique puissante, de l'*arc voltaïque* proprement dit.

Sir Humphry Davy se servit d'une pile de 2000 éléments d'une surface active de plus de 80 mètres carrés et obtint alors, entre deux tiges de charbon en communication avec les pôles, une lumière éblouissante et continue qui jaillissait sans bruit sensible.

Pourquoi les machines à frottement qui donnent une étincelle ne peuvent-elles donner de lumière intense comme les piles ou les machines électro-dynamiques?

Cela s'explique facilement en se reportant à ce que nous avons dit sur la *quantité* et la *tension* des courants électriques.

Le courant fourni par une pile présente en général une grande quantité et une faible tension, tandis que l'électricité fournie par les machines à plateau de verre ou d'ébonite a, au contraire, une énorme tension et une faible quantité.

Puisque le grand éclat de l'arc voltaïque provient des particules de la substance des pôles, portées au rouge blanc éblouissant dans leur trajet d'un pôle à l'autre, on conçoit qu'une étincelle grêle, qui n'entraîne que peu de particules des électrodes, soit plus sensible au refroidissement causé par l'air ambiant.

En 1850, *Masson*, professeur de physique à l'École centrale, fit de nombreuses expériences sur l'arc voltaïque et montra que l'électricité ne produit pas de courant dans le vide absolu, ce qui impose la présence d'une matière pondérable. Il établit que l'étincelle électrique est produite par un courant qui se propage à travers la matière pondérable et l'échauffe de la même manière, et suivant les mêmes lois qu'un courant voltaïque échauffe et rend lumineux un fil métallique.

Matteucci, vers la même époque, étudia la conductibilité de l'arc jaillissant entre des pointes de substance variée, et trouva qu'elle dépend moins de la conductibilité des métaux formant les pointes, que de la facilité que ces mêmes métaux ont à se fondre et à se volatiliser.

Il remarqua aussi la différence de température des deux pôles, différence d'autant plus grande que ces pôles sont constitués par une matière moins conductrice ou plus facile à se désagréger et à brûler par la chaleur. La grande différence que l'on observe entre deux pointes de charbon est due surtout à la combustion. qui, par l'échauffement très inégal des deux pôles, se produit inégalement, et dans un rapport de 2 à 1 environ, le pôle positif étant le plus chaud; cet échauffement inégal est d'ailleurs accompagné par une différence dans la désagrégation moléculaire de leur substance qui peut, à son tour, modifier la résistance électrique et la chaleur développée.

La longueur de l'arc varie avec la tension du courant; elle peut atteindre 4 à 5 centimètres avec des courants appropriés, sa forme dépend aussi de sa longueur. Lorsque l'arc est court, il ressemble à une gerbe condensée de filets lumineux affectant une forme générale cylindrique.

Une atmosphère plus rare et de couleur violette entoure comme d'une gaîne la première gerbe, et la base de ce cylindre annulaire s'élargit sur le charbon positif tandis que sa partie opposée s'éteint en arrivant au pôle négatif.

Si nous allongeons l'arc voltaïque, la gerbe devient moins condensée et plus grêle, et la gaîne violette qui l'enveloppe présente

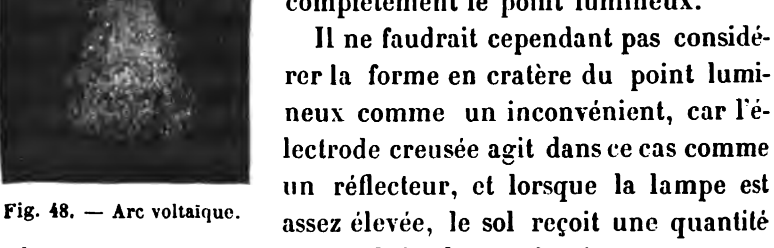
davantage l'aspect d'une flamme. La partie centrale se compose de particules incandescentes qui se détachent des extrémités fondues des pointes, paraissent s'attirer entre elles et former une chaîne continue entre les pointes. La partie extérieure de l'arc est le produit de la matière encore plus divisée.

Dans l'air, l'arc voltaïque se produit et consume rapidement les charbons, mais inégalement, dans le rapport de 1 à 2 environ. Il résulte de cette combustion inégale que le point lumineux se déplace et que les électrodes se déforment ; le pôle positif se creuse en forme de cratère (fig. 48) et entoure le point lumineux d'une sorte de rebord plus ou moins saillant.



Fig. 48. — Arc voltaïque.

Ces phénomènes se produisent avec les courants *continus*. Avec les courants *alternatifs*, l'usure des charbons est égale et régulière ; les deux extrémités sont en forme de pointe, ce qui dégage plus complètement le point lumineux.



Il ne faudrait cependant pas considérer la forme en cratère du point lumineux comme un inconvénient, car l'électrode creusée agit dans ce cas comme un réflecteur, et lorsque la lampe est assez élevée, le sol reçoit une quantité de lumière plus grande que le plafond, ce qui présente un avantage assez important.



Pour l'éclairage des phares même, la concavité déterminée sur l'électrode positive peut fournir, en plaçant convenablement le charbon négatif, une lumière qui augmente dans un rapport assez considérable l'intensité de la lumière émise *dans une direction donnée*.

La lumière ainsi produite est dite *lumière condensée ;* on l'obtient en disposant le charbon inférieur, qui est négatif, de manière que son axe soit dans le prolongement du côté du charbon supérieur faisant face à l'horizon qu'on veut éclairer. Par cette

disposition, si la lumière produite par les charbons placés dans le prolongement l'un de l'autre est 100, on obtient dans différentes directions les intensités suivantes :

Devant	287
Sur chaque côté	116
Derrière	38

On aura donc intérêt, suivant les applications, à produire de la lumière condensée ou de la lumière ordinaire.

Pour produire de la lumière électrique avec l'arc voltaïque, il faut donc trois choses distinctes :

1° Produire le courant électrique. Nous avons examiné dans la première partie tout ce qui se rattache à cette question.

2° Faire passer ce courant entre deux charbons. Nous allons voir, en examinant les charbons à lumière, que trouver un bon charbon n'est pas toujours chose facile et que, de ce côté encore, il y a beaucoup de recherches à faire.

3° Maintenir un écartement convenable entre ces deux charbons. C'est le rôle des régulateurs à arc voltaïque dont nous examinerons les principes et les formes les plus employées.

Charbons à lumière. — Sir *Humphry Davy*, qui, le premier, vit jaillir l'arc voltaïque, se servait de charbon de bois éteint dans l'eau ou le mercure, mais la combustion était extrêmement rapide et ce charbon n'aurait jamais permis des éclairages électriques de longue durée. Un grand progrès fut fait lorsque *Foucault* eut l'idée d'employer le charbon des cornues à gaz, en y taillant des baguettes carrées. Ce charbon manque d'homogénéité et renferme de la silice qui fond, se vaporise et fait éclater le charbon au détriment de la fixité de la lumière.

En 1842, *Bunsen* cherchait à se procurer des cylindres creux de charbon moulé pour ses piles à acide azotique. Il imagina dans ce but de mouler de la houille sèche pulvérisée en l'agglomérant par une colle, puis de la cuire. Il obtenait ainsi un cylindre de charbon fendillé et peu solide.

Pour souder ce cylindre, il imagina de le tremper dans un

sirop de sucre qui remplissait les crevasses et de le recuire de nouveau ; le sucre ainsi distillé bouchait les pores et laissait un charbon bien pur et compact. S'il restait des trous pendant la cuisson, on recommençait l'opération, et ainsi de suite autant de fois qu'il était nécessaire pour avoir un charbon sans défauts.

En 1846, *Staite* et *Edwards* prirent un brevet pour un procédé de fabrication analogue, mais en spécifiant l'emploi de ces charbons pour la production de l'arc voltaïque.

En 1849, *Le Molt* brevetait une composition formée de 2 parties de charbon de cornue, 2 parties de charbon de bois et 1 partie de goudron liquide, le tout bien trituré, malaxé, comprimé, moulé, trempé dans un sirop de sucre, cuit pendant vingt ou trente heures et purifié par des immersions dans dés acides.

En 1852, *Watson* et *Slater* préparaient un charbon provenant de *brindilles* purifiées à la chaux, recuites, trempées dans une solution d'alun, recuites de nouveau, trempées dans une solution de mélasse et recuites une troisième fois.

En 1857, *Lacassagne* et *Thiers* taillaient des baguettes dans les parois intérieures des cornues à gaz, les trempaient dans un bain de potasse ou de soude caustique fondue par la voie ignée pour transformer la silice en silicate soluble. En lavant ensuite les baguettes à l'eau bouillante et en les soumettant à la température rouge, à un courant de chlore, on transformait des terres non attaquées par la potasse ou la soude en chlorures volatils de silicium, de potassium, de fer, etc. La lumière obtenue avec ces charbons était un peu plus régulière, mais ils produisaient beaucoup de cendres et de flammèches.

M. *Jacquelain*, en employant des produits très purs et en formant ses charbons avec le goudron provenant déjà d'une première distillation, a obtenu des plaques qui, débitées en baguettes, ont donné une lumière tranquille, blanche et 25 pour 100 plus intense, à courant égal, que celle des charbons ordinaires.

En 1877, M. *Archereau* a fait d'excellents charbons composés de carbone aggloméré et comprimé, mêlé à la magnésie.

M. *Carré* fabrique aujourd'hui, sur une grande échelle, des charbons à lumière dans lesquels il incorpore des sels métalliques qui donnent, suivant leur nature, plus de fixité ou une plus belle coloration. La fabrication est devenue meilleure et plus rapide par l'emploi de la filière, indiqué par Archereau dès 1855.

On agglomère un mélange de poudre de charbon bien pur, coke et noir de fumée, à l'aide d'un sirop de sucre gommeux; on le triture et on le passe à la filière sous une pression de 100 atmosphères environ; les baguettes ainsi obtenues sont cuites, puis trempées rouges dans le sirop, recuites de nouveau et ainsi de suite un certain nombre de fois. Le charbon ainsi préparé est bon conducteur électrique; il brûle assez lentement sans craquement et sans trop de flammèches.

Le charbon employé par *Gaudin* dans la fabrication de ses charbons, en 1877, provenait de la décomposition en vase clos des brais secs, gras ou liquides, des goudrons, résines, bitumes, etc., susceptibles de laisser du carbone suffisamment pur, après leur décomposition par la chaleur. Le moulage se fait à une très haute pression obtenue par l'emploi de la presse hydraulique.

Il résulte d'expériences faites par M. Fontaine que la lumière produite par des charbons de cornue étant de 103 becs, celle produite avec les crayons Archereau valait 120 becs, les crayons Carré fournissaient 180 becs. Les charbons Gauduin donnaient de 200 à 210 becs Carcel pour une même source électrique, tout en s'usant moins vite que les crayons Carré. Aujourd'hui la fabrication de charbons de M. Carré est la plus renommée; il fournit des baguettes très lisses et très droites de toutes dimensions depuis 1 jusqu'à 20 millimètres de diamètre. On emploie aujourd'hui presque exclusivement des charbons cylindriques dont les dimensions varient avec la nature des éclairages à produire.

Les lampes à incandescence de M. Reynier usent des baguettes de 2 à 3 millimètres; les lampes Werdermann, les bougies Jamin et Jablochkoff emploient des charbons de 4 à 5 millimètres.

Les régulateurs alimentés par les machines Gramme type d'a-

telier et autres machines de puissance semblable se servent de charbons de 7 à 10 millimètres ; les puissants régulateurs des phares et de la marine emploient des charbons dont le diamètre atteint quelquefois 20 millimètres. Enfin le régulateur monstre de M. Brush a fonctionné à l'Exposition universelle d'électricité avec des charbons de *cinquante* millimètres de diamètre.

Classification des foyers électriques à arc voltaïque. — Il importe, en présence du grand nombre d'appareils qui sont aujourd'hui employés pour transformer l'énergie électrique en lumière, d'établir une classification rationnelle et méthodique qui permette de les ramener tous à un petit nombre de types nettement définis et caractérisés.

On peut d'abord les grouper en deux grandes classes :

1° Les *régulateurs*, dans lesquels un mécanisme plus ou moins compliqué approche les charbons pour produire l'allumage, les écarte ensuite et les maintient à la distance convenable. En général, ces charbons sont constitués par des crayons placés *bout à bout*.

2° Les *bougies*, dans lesquelles les crayons de charbon sont placés *parallèlement*, côte à côte, caractérisées par l'absence complète de mécanisme ou un mécanisme rudimentaire destiné non pas à *régler* l'écartement mais seulement à *produire l'allumage* et le réallumage automatiques du foyer.

CHAPITRE I

LES RÉGULATEURS

Régulateurs à main. — Jusqu'en 1844, la lumière produite par l'arc voltaïque ne reçut aucune application pratique ; elle constituait jusqu'à ce moment une intéressante expérience répétée dans le cours de physique et pas autre chose, car on ne disposait ni de piles puissantes ni de charbons appropriés. En 1844, *Léon Foucault* employa la pile Bunsen, qui venait de naître, et remplaça les baguettes de charbon de bois, employées depuis *Davy*, par des baguettes prises dans le charbon de cornues à gaz. Il construisit alors une lampe très simple, manœuvrée à la main et put obtenir des épreuves photographiques, en même temps que M. *Deleuil* faisait des expériences publiques, par le même procédé, sur la place de la Concorde, à Paris.

Il va sans dire que le procédé de réglage à la main est aussi barbare que primitif et il est aujourd'hui presque complètement abandonné.

Régulateurs à électrodes circulaires. — Il est à remarquer que les premiers appareils réellement *automatiques* étaient à *charbons circulaires;* comme aujourd'hui on ne les emploie plus, nous n'en dirons que quelques mots.

Le plus ancien date de 1845 et est dû à *Thomas Wright*, de Londres, qui eut l'idée de faire jaillir l'arc entre des disques taillés en biseau sur leur circonférence et mis en mouvement par un mécanisme spécial.

En 1849, un physicien français, M. *Le Molt*, fit breveter un appareil analogue pouvant fonctionner vingt ou trente heures sans toucher à la lampe.

En 1857, *Harrison* combina aussi un régulateur automatique à arc voltaïque dans lequel il y avait une seule électrode circulaire placée à la partie inférieure et reliée au pôle négatif de la source électrique ; l'électrode positive était constituée par un crayon de charbon fixé à un tube métallique taraudé, dont un mouvement d'horlogerie permettait de produire l'avancement au fur et à mesure de l'usure des charbons (1).

En 1877, M. *Reynier* a repris le problème des lampes à double disque et a réalisé un appareil dans lequel les disques de charbon sont portés par deux systèmes de leviers articulés, isolés l'un de l'autre et mis en mouvement par deux mécanismes d'horlogerie indépendants. L'écartement est réglé par l'action d'un solénoïde et les disques tournent lentement sous l'action des mouvements d'horlogerie pour présenter successivement tous les points de leurs circonférences au foyer lumineux. Les disques de charbon portent de grandes ombres qui en ont fait rejeter l'emploi dans les régulateurs, et aujourd'hui on emploie presque exclusivement les charbons sous forme de baguettes carrées ou rondes.

Classification des régulateurs. — Tous les régulateurs utilisent les variations produites dans le courant pour réagir sur un mécanisme qui approche ou qui éloigne le charbon.

Certains régulateurs ne permettent de placer qu'un seul foyer sur une source électrique donnée, pile ou machine, ce sont les régulateurs *monophotes*. D'autres permettent d'en placer 2, 4, et jusqu'à *quarante* sur un seul et même courant, ce sont les régulateurs *polyphotes* ou régulateurs *à division*. Nous examinerons successivement ces deux classes.

(1) Voir l'*Éclairage à l'électricité*, de H. Fontaine, 2e édition.

RÉGULATEURS MONOPHOTES.

Les régulateurs monophotes présentent tous ce caractère commun que le système électro-magnétiqne qui produit le réglage de la distance des charbons est placé sur le même circuit que l'arc lui-même. Il se trouve donc traversé par le courant tout entier, et ce sont les variations de l'*intensité* de ce courant qui agissent pour rapprocher ou éloigner les charbons, suivant le cas.

Les premiers régulateurs étaient tous établis dans ces conditions; les variations du courant agissaient tantôt sur un solénoïde, comme dans le régulateur d'Archereau, tantôt sur un électro-aimant commandant un mouvement d'horlogerie, comme dans celui de Foucault. Il nous suffira de décrire quelques types pour en faire comprendre le principe et montrer de quelles variétés ce principe est susceptible dans l'application.

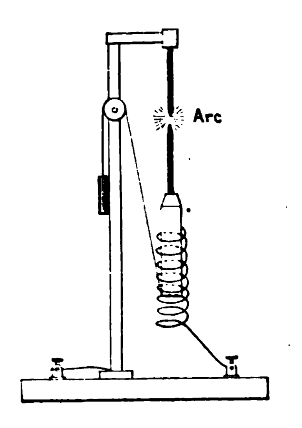


Fig. 49. — Diagramme de fonctionnement des régulateurs monophotes, réglage par l'*intensité* du courant. Principe du régulateur Archereau.

Régulateur Archereau. — C'est un des premiers régulateurs qui ait été construit, car il remonte à l'année 1848. La figure 49 ci-contre perme d'en saisir facilement le principe.

Le charbon positif supérieur est fixe, le charbon négatif inférieur repose sur un cylindre, moitié en fer, moitié en cuivre, placé dans un solénoïde que traverse le courant, il est équilibré par un contre-poids. L'action du solénoïde produit et maintient l'écart entre les deux charbons en exerçant une attraction magnétique sur la tige de fer qui termine le charbon négatif, à la condition que les rapports entre la puissance du solénoïde, le poids de la tige et l'intensité du courant soient bien établis.

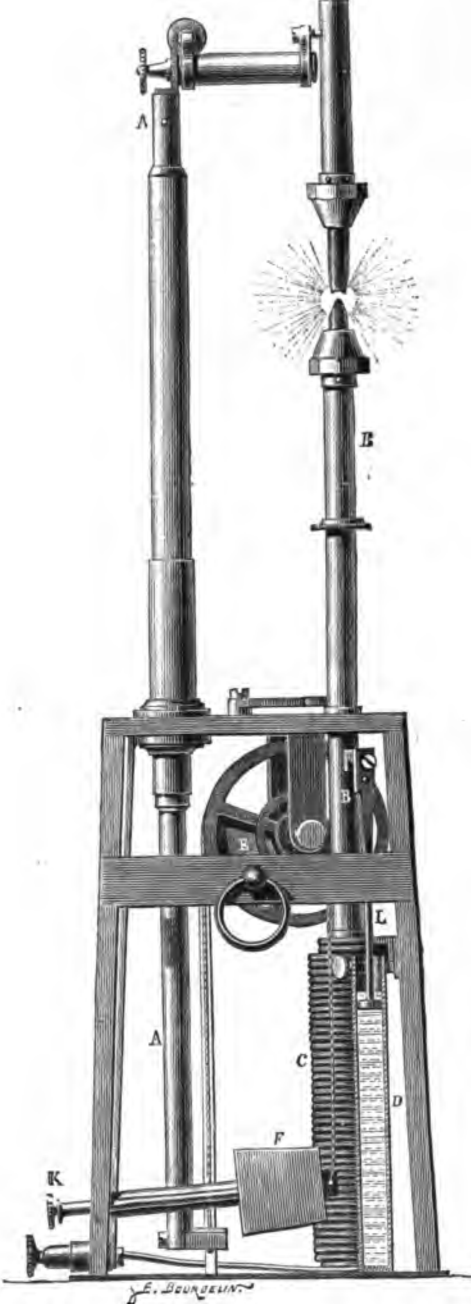


Fig. 50. — Régulateur Jaspar.

Le régulateur Archereau est aujourd'hui abandonné parce que le point lumineux n'est pas fixe dans l'espace et que, d'autre part, il est assez difficile de régler l'action du solénoïde de manière à ne pas causer la rupture de l'arc voltaïque.

Régulateur Jaspar. — Dans cet appareil le rapprochement des charbons tend à se produire par le poids du charbon positif et leur écart par l'action d'un solénoïde, comme dans le système Archereau. Pour éviter les mouvements brusques et donner au charbon négatif un bon contact, il porte une tige latérale plongeant dans du mercure. Un contre-poids à action variable permet de régler l'appareil suivant l'intensité du courant qui le traverse. Un autre contre-poids mobile règle à chaque instant l'action du poids mobile et conserve à l'arc la même longueur pendant toute la durée des crayons.

L'appareil se compose de deux tiges porte-charbons mobiles A et B (fig. 50). La tige A reliée au pôle positif de la machine est guidée verticalement et est munie à sa partie inférieure d'une portée à laquelle est attachée une corde fixée sur la jante d'une poulie de transmission portant un contre-poids E.

La tige B soutient le charbon négatif, elle est en fer à sa partie inférieure et pénètre dans un solénoïde C. Elle est aussi reliée par une petite corde à une seconde poulie faisant corps avec la première et d'un diamètre moitié moindre, de telle sorte qu'à mesure que la tige A descend, la tige B remonte d'une quantité moitié moindre. A la tige B se trouve relié un piston se mouvant dans un cylindre D rempli de mercure en laissant un petit jeu latéral. Un contre-poids F coulisse sur un levier horizontal qui est attaché à une troisième poulie faisant corps avec les deux premières. On peut éloigner ou rapprocher le contre-poids F à l'aide d'un bouton placé extérieurement.

Au repos, les charbons sont en contact. Au moment où le courant passe, le solénoïde attire le noyau de fer de la tige inférieure et maintient l'écart.

Lorsque l'arc s'allonge, le courant s'affaiblit et les charbons sollicités par le poids de la tige A se rapprochent un peu. Le contre-poids F agit en sens opposé de la tige A puisque, par l'enroulement des cordes, il tend à produire l'écart. Le réglage s'obtient donc aisément par le déplacement du poids F sur la tige, le poids F doit être d'autant plus rapproché du point d'attache de la corde que le régulateur doit fonctionner avec des courants plus intenses.

Le piston plongeant dans le mercure donne une grande douceur aux mouvements de réglage et il assure en même temps un excellent contact à la tige négative.

L'action du solénoïde sur la tige du porte-charbon B n'est pas la même à la fin qu'au commencement.

Cette différence d'action est compensée par le petit contre-poids E qu'on règle en l'approchant plus ou moins du centre. Au commencement, le contre-poids E n'a aucune action; à la

fin, son poids s'ajoute à celui du contre-poids F pour contre-balancer l'action du solénoïde qui est alors plus grande.

Dans une autre disposition, le mécanisme est placé *au-dessus* du point lumineux, au lieu d'être placé au-dessous, mais cela ne change rien au principe et n'apporte à l'appareil que des modifications de détail.

Dans le régulateur à solénoïde de M. *Reynier*, analogue en principe à celui d'Archereau, le charbon inférieur est équilibré par un ressort placé sous le fer doux dans le solénoïde et combiné de telle sorte que, sous la poussée de ce ressort, le fer remonte en cheminant de quantités égales à la somme des longueurs de charbon usées, de manière à maintenir constante la longueur de l'arc voltaïque. Moins complet que les régulateurs Duboscq et Serrin, mais aussi beaucoup moins coûteux, ce petit appareil suffit pour la plupart des expériences d'optique.

Régulateurs à ressort moteur. — Dans une autre série d'appareils, au lieu d'appliquer la variation du courant au déplacement *direct* des charbons, on utilise les mouvements à des déclanchements de mouvements d'horlogerie.

Le premier de ces régulateurs a été imaginé par *Foucault*. construit et perfectionné ensuite par M. *Duboscq* qui l'emploie dans ses appareils de projection et pour les effets de lumière électrique, dans l'éclairage des scènes de théâtre. Dans l'appareil primitif, il fallait écarter les charbons à la main pour régler la position des charbons et former l'arc voltaïque. Dans l'appareil perfectionné il y a deux mouvements d'horlogerie distincts, l'un qui sert au rapprochement des charbons et l'autre à leur écartement. Un électro-aimant placé dans le circuit déclanche l'un ou l'autre de ces mécanismes suivant que le courant est plus ou moins intense. On peut élever ou abaisser le point lumineux pendant la marche, — propriété indispensable pour les projections, — en faisant tourner à la main une des roues dentées d'un barillet de rapprochement ou d'éloignement des charbons. Cet appareil présente l'avantage de pouvoir fonctionner dans

toutes les positions, mais il est assez délicat et a besoin d'être réglé pour chaque application spéciale.

Régulateur de M. Serrin. — Le régulateur que M. Serrin a si bien étudié et perfectionné est celui qui, jusqu'à ce jour, a reçu le plus grand nombre d'applications pratiques, car il répond presque complètement, et d'une façon relativement simple, à tous les besoins d'un appareil de ce genre.

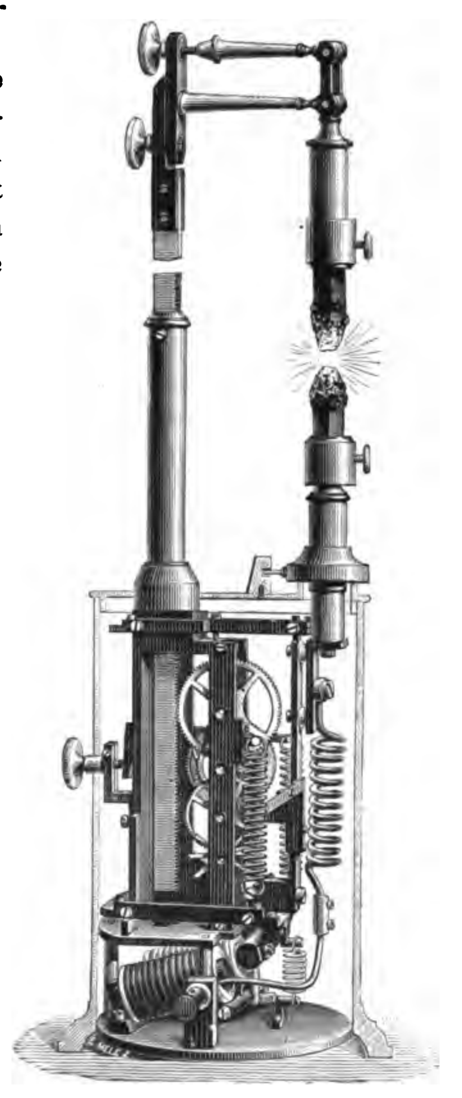


Fig. 51. — Régulateur de M. Serrin. Modèle de M. Suisse.

L'appareil de M. Serrin, en effet, laisse le charbon en contact quand le courant ne circule pas; après les avoir écartés à la distance voulue, lorsque le courant est établi, il les rapproche graduellement sans les laisser arriver de nouveau au contact. Si l'arc est rompu pour une cause quelconque, telle qu'un violent coup de vent ou la rupture d'un charbon, l'appareil les ramène de nouveau au contact, puis les éloigne à la distance nécessaire pour que l'arc voltaïque se produise dans les meilleures conditions.

Pour réaliser toutes ces conditions, le porte-charbon posi-

tif (fig. 51) constitue une crémaillère agissant sur une série d'engrenages à multiplication de vitesses, dont le dernier correspond à une roue portant un certain nombre de longues dents en forme d'étoile. C'est un système à poids moteur.

Lorsque le courant ne traverse pas l'appareil et que les charbons sont séparés, le défilement des engrenages a lieu jusqu'à ce que les deux charbons se touchent. A ce moment, l'électro-aimant devient actif et, en attirant son armature, fait descendre un parallélogramme articulé auquel il est fixé ; ce parallélogramme embraye la roue à dents, arrête par suite la descente du charbon positif supérieur et fait descendre le charbon négatif inférieur relié à ce parallélogramme. Si l'arc s'allonge, l'intensité du courant s'affaiblit, le parallélogramme remonte sous l'action des deux ressorts qui le supportent et produit le déclanchement de la roue étoilée, ce qui permet au charbon supérieur de descendre d'une certaine quantité jusqu'à ce que, l'arc suffisamment raccourci et l'intensité ramenée à sa valeur normale, il y ait un nouvel arrêt et par suite un nouvel état d'équilibre. Si, au contraire, les charbons sont trop rapprochés, l'intensité du courant augmente et le parallélogramme, attiré plus fortement par l'électro-aimant, descend davantage et produit un plus grand allongement de l'arc voltaïque. On voit sur la gauche un bouton qui sert à tendre ou à détendre le ressort antagoniste faisant équilibre à l'action de l'électro-aimant.

Dans ce modèle, construit par M. Suisse, le point lumineux se déplace et descend au fur et à mesure de la combustion des charbons. Dans un modèle plus complet, le point lumimeux reste fixe dans l'espace, car le charbon positif descend et le charbon négatif monte en même temps dans un rapport calculé à l'avance et très voisin de 2.

Les régulateurs Serrin sont employés le plus souvent avec les machines Gramme du type d'atelier (page 55). La sensibilité extrême du régulateur Serrin constitue, dans ces conditions, un inconvénient que nous devons signaler. Lorsque les charbons renferment des impuretés il se produit des variations dans la

puissance de l'électro-aimant, ce qui fait osciller le porte-charbon inférieur. Ces oscillations augmentent ou diminuent l'intensité de l'arc voltaïque et par suite sa résistance.

Mais, comme le courant produit par les machines dynamo-électriques varie beaucoup avec la résistance du circuit extérieur, — représentée ici par l'arc voltaïque, — il en résulte, par ce fait seul, des variations d'intensité qui multiplient la valeur des oscillations premières et rendent la lumière très instable.

Ici le régulateur Serrin pèche par excès de qualités.

On remarque même, à ce sujet, que si les conducteurs ont une résistance un peu grande, les lampes, tout en fournissant moins de lumière, à cause de l'affaiblissement du courant par la résistance du circuit, fonctionnent cependant avec plus de régularité. Cela tient à ce que les variations de résistance de l'arc, tout en conservant la même valeur absolue, ont une moins grande influence sur la résistance totale du circuit. Avec un bon générateur et des charbons bien purs, ces défauts sont évités. A ce point de vue, le montage Wheatstone (page 48), appliqué aux machines dynamo-électriques, constitue un grand progrès dont les générateurs électriques de M. Gramme seront, nous l'espérons, bientôt munis, car dans les machines ainsi disposées, les variations des éléments électriques avec la résistance du circuit extérieur sont *favorables* à la régularité du fonctionnement des régulateurs, au lieu de leur être contraires.

Régulateur Siemens et Hefner-Alteneck. — Ce régulateur à poids moteur a été combiné pour fonctionner avec les machines Siemens et Hefner-Alteneck (page 59).

Dans ce régulateur à courant continu, le mouvement d'approche des charbons est produit par le poids du porte-charbon positif, qui sert de moteur. Le mouvement d'écartement, au contraire, se produit par un appareil qui n'est autre chose qu'un petit moteur électrique, dont nous allons examiner maintenant le fonctionnement (fig. 52).

Les organes principaux du régulateur Siemens sont : les deux porte-charbons A et B, un mouvement d'horlogerie actionné

par le poids du porte-charbon A et dont le dernier mobile est une roue à rochet dont la vitesse de rotation est modérée par une roue à aillettes I.

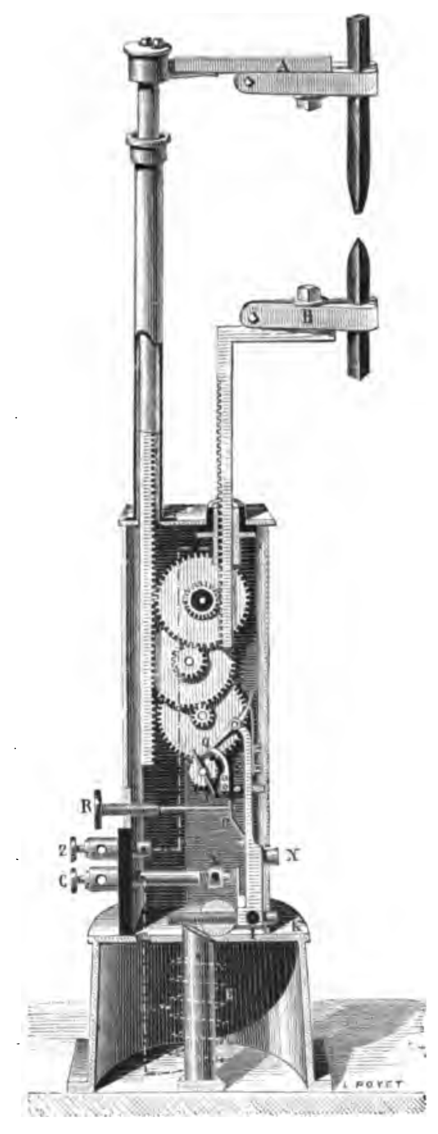


Fig. 52. — Régulateur Hefner-Alteneck à courants continus.

Le courant de la machine arrive par la borne C, traverse un électro-aimant E, dont on n'a représenté qu'un des noyaux, arrive par le corps de la lampe au porte-charbon positif A, traverse l'arc et revient à la machine par le porte-charbon B, placé dans une garniture isolée, et la borne Z reliée au pôle négatif.

Au moment où l'on envoie le courant dans la lampe, les charbons sont en contact, le courant est très intense; il attire son armature cylindrique, fixée à un grand levier vertical pivotant autour de Y. Ce levier bascule de droite à gauche autour de Y, et un cliquet Q, fixé à son extrémité, fait tourner la roue I d'une dent en sens inverse du mouvement du charbon, mais à ce moment il se produit un contact en X : le courant traverse alors directement la dérivation de faible résistance produite par ce contact, et l'électro-aimant devient inerte. Sous l'action du res-

sort P, réglé par la vis R, le levier reprend sa position première; mais alors le contact en X est rompu, l'aimant est actionné de nouveau : il attire son armature, et la roue I tourne de nouveau d'une dent dans le sens favorable à l'écartement des charbons. Il se produit donc ainsi une succession rapide de mouvements, comme dans le trembleur des sonneries électriques, qui ont pour effet d'écarter les charbons très rapidement jusqu'à une distance normale, pour laquelle l'appareil est réglé. Lorsque cette distance est atteinte, le cliquet Q produit l'embrayage et maintient l'écartement. Le levier est alors près du contact X, et si l'appareil est bien réglé, on sent en mettant le doigt en N une sorte de *frémissement*, qui est l'indice le plus certain de ce bon réglage. Si l'arc s'allonge, l'armature tend à s'éloigner de E et produit le déclanchement de la roue I, ce qui permet le rapprochement des charbons. On dispose dans cet appareil de trois moyens de réglage :

1° La tension du ressort P;

2° La distance de l'armature à l'électro-aimant E, distance que l'on règle à l'aide d'une vis K;

3° Le contact X, réglé une fois pour toutes par le conducteur d'après la course du levier et la longueur des dents du rochet.

En pratique, en agissant sur le ressort P, à l'aide de la vis R, on obtient un bon fonctionnement de l'appareil, auquel on pourrait peut-être reprocher une certaine délicatesse dans les organes et le bruit produit par les mouvements du levier.

Quoi qu'il en soit, cet appareil est fréquemment employé en Angleterre et en Allemagne, au même titre que le régulateur Serrin en France.

Régulateur de M. Carré. — Dans les régulateurs de M. Carré, appliqués plus spécialement aux courants *alternatifs*, le poids du charbon supérieur sert aussi de moteur comme dans les appareils de M. Serrin, mais l'action du courant s'exerce sur des solénoïdes dans lesquels pénètrent des tiges de fer doux reliées au mouvement d'écartement des charbons et de déclanchement.

Régulateur Hiram-Maxim. — Le régulateur de M. *Maxim* est caractérisé par ce fait que les charbons se rapprochent très vite si le courant ne les traverse pas, comme au moment de l'allumage par exemple, et très lentement quand l'arc est formé. (Voir l'*Éclairage à l'électricité*, de M. Fontaine.) On évite ainsi tout rapprochement brusque des électrodes et l'on obtient une lumière d'une grande fixité.

Ces régulateurs éclairaient les projecteurs placés au-dessus de l'entrée principale de l'Exposition d'électricité. Ils conviennent surtout aux puissants foyers.

Régulateur Bürgin. — Dans cet appareil, l'écartement des charbons se produit par l'action d'un parallélogramme articulé portant le charbon inférieur, et l'arrêt par un petit sabot formant frein sur une poulie de grand diamètre qui vient s'y appuyer pour produire l'embrayage lorsque l'arc a atteint sa longueur normale. Si l'arc s'allonge, l'intensité du courant diminue et l'électro-aimant devenant moins puissant, le frein est desserré et le rapprochement des charbons peut se produire. L'appareil est si sensible que lorsque la machine Gramme qui l'alimente est mise en action par un moteur à gaz à explosion, comme le moteur Otto par exemple, le mouvement de l'armature du régulateur trahit toutes les variations de vitesse, en même temps que l'intensité de la lumière augmente ou diminue.

Dans le régulateur monophote de M. *Crompton*, l'électro-aimant agit sur deux armatures, une, lourde, qui sert seulement à produire l'écart, l'autre, légère, qui agit sur le déclanchement du mouvement d'horlogerie réglant le rapprochement des charbons.

Dans le système de M. *Girouard*, aujourd'hui abondonné à cause de sa complication, le mécanisme de réglage est commandé par un relai placé à distance.

M. *Dornfeld*, électricien aux aciéries de M. F. Krupp à Essen. a aussi combiné un régulateur à frein analogue à celui de M. Bürgin, mais dans lequel la descente du charbon positif est ralentie par un volant à ailettes tournant dans un bain

de mercure ; le sabot du frein fonctionne à l'aide d'un solénoïde qui sert à la fois à l'embrayage, au débrayage et au recul des charbons.

On voit par ces exemples que le nombre des régulateurs monophotes peut être infini. Il suffit pour en *inventer* un nouveau, de combiner convenablement les aimants, solénoïdes, mouvements d'horlogerie, ressorts, poids moteurs, qui se retrouvent individuellement dans chaque appareil. Sans vouloir dénigrer beaucoup d'autres appareils excellents, on peut dire que le régulateur de M. Serrin et celui de M. Jaspar sont les meilleurs régulateurs monophotes que nous ayons vu fonctionner à l'Exposition d'électricité.

RÉGULATEURS POLYPHOTES OU A DIVISION.

Lorsque l'on place plusieurs régulateurs monophotes sur un même circuit, on constate qu'il est impossible de les faire fonctionner longtemps sans qu'ils se dérèglent. On comprendra facilement la raison de cette impossibilité en pensant au principe même de l'action de réglage. Il faut pour que l'appareil soit en équilibre, que l'*intensité* du courant ait une valeur donnée. Il arrive alors pratiquement qu'un des deux arcs placés sur le même circuit a une longueur trop grande et l'autre une longueur trop petite, sans que pourtant l'intensité du courant cesse d'avoir la valeur qui correspond à l'équilibre dans chacune des lampes. Il faut donc assurer l'indépendance de chacune d'elles en agissant sur la résistance propre de l'arc pour le raccourcir s'il est trop long, l'allonger s'il est trop court, indépendamment de tous les autres placés sur le même circuit.

Les régulateurs polyphotes sont ceux qui réalisent cette condition.

Le principe qui a permis de réaliser ces appareils est celui de la *dérivation*. Il a été appliqué aux régulateurs avant même qu'on ne songe à réaliser la division de la lumière, alors que les piles étaient la seule source électrique connue capable de

produire l'arc voltaïque. Dans le régulateur à écoulement de mercure de Lacassagne et Thiers, on trouve déjà une bobine de dérivation dont le rôle était de raccourcir l'arc voltaïque lorsque les charbons étaient trop éloignés en laissant écouler du mercure, ce qui soulevait le porte-charbon inférieur.

Cette disposition d'électro en dérivation a été reprise plus tard lorsque, en présence de la puissance en quelque sorte illimitée des machines dynamo-électriques, on a voulu alimenter plusieurs foyers placés sur un même circuit par une seule machine.

Les régulateurs à division peuvent se diviser en deux classes distinctes par les actions électriques en jeu.

a. Les *régulateurs différentiels* dans lesquels le réglage tend à établir un équilibre entre l'*intensité* du courant qui traverse l'arc voltaïque et la différence de potentiel ou de *pression* à la base des deux charbons, différence intimement liée à la résistance électrique de l'arc.

b. Les *régulateurs à dérivation* dans lesquels l'intensité du courant qui traverse les charbons ne joue plus aucun rôle, le réglage tend à maintenir constante la différence de potentiel aux deux bornes de la lampe; il agit donc plutôt par la variation de la *résistance* de l'arc que par les variations de l'*intensité* du courant qui le traverse.

Dans les deux systèmes, le réglage de chaque lampe est individuel et *indépendant*, dans une très grande mesure, de celui des autres lampes placées dans le même circuit, condition indispensable à leur bon fonctionnement.

Cela se comprendra mieux en étudiant le fonctionnement des principaux appareils fondés sur ces deux systèmes.

a. — Régulateurs différentiels.

Le type des appareils de cette nature est le régulateur différentiel de M. Hefner-Alteneck, plus connu sous le nom de régulateur ou lampe différentielle de M. Siemens.

Lampe différentielle de M. Siemens. — Bien que le sys-

tème fonctionne toujours avec des courants alternatifs, on peut, pour l'explication, considérer le courant comme continu à l'instant considéré. Étudions d'abord ce fonctionnement sur le diagramme (fig. 53).

Le courant arrivant de la machine en L (fig. 53) se divise en deux parties : une partie du courant traverse une bobine T formée de fil très fin et très résistant, et sort par *b*L′ pour aller à la lampe suivante ; une seconde partie du courant traverse une bobine R à fil gros et court ; en sortant de R, il traverse l'arc voltaïque formé entre les charbons *g*, *h* et va par *b*L′ à la lampe suivante.

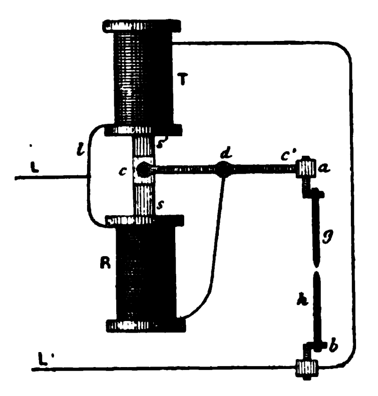


Fig. 53. — Diagramme de la lampe différentielle de M. Siemens.

Le courant est donc partagé en deux fractions très inégales, la plus faible traverse la bobine T qui a une résistance *fixe* et très grande ; la plus grande partie du courant traverse l'arc voltaïque qui constitue une résistance *variable* avec l'écartement des charbons. Plaçons à l'intérieur de chaque bobine une tige de fer doux *s*, *s*′, reliée par un levier *cda* au charbon *ga*, et voyons ce qui va arriver.

Chacune des bobines attire le solénoïde qui lui correspond avec une force proportionnelle à l'intensité et au nombre de tours. On conçoit donc que, pour une certaine résistance convenablement réglée de l'arc voltaïque, les résistances relatives des deux circuits seront telles que les actions des bobines sur les tiges *s*, *s*′ soient égales et le levier *cda* prendra une certaine position d'équilibre. Si la résistance de l'arc vient à *augmenter*, cet équilibre sera détruit, l'action de la bobine T deviendra prépondérante, le levier *cda* oscillera autour de *d* et rapprochera les charbons. L'inverse se produirait si la résistance venait à diminuer, car alors la bobine R exerçant une plus grande

action sur la tige a', il y aurait écart des charbons. Le régulateur n'agit plus alors par les variations de l'intensité du courant dans le circuit, comme dans la lampe Serrin, par exem-

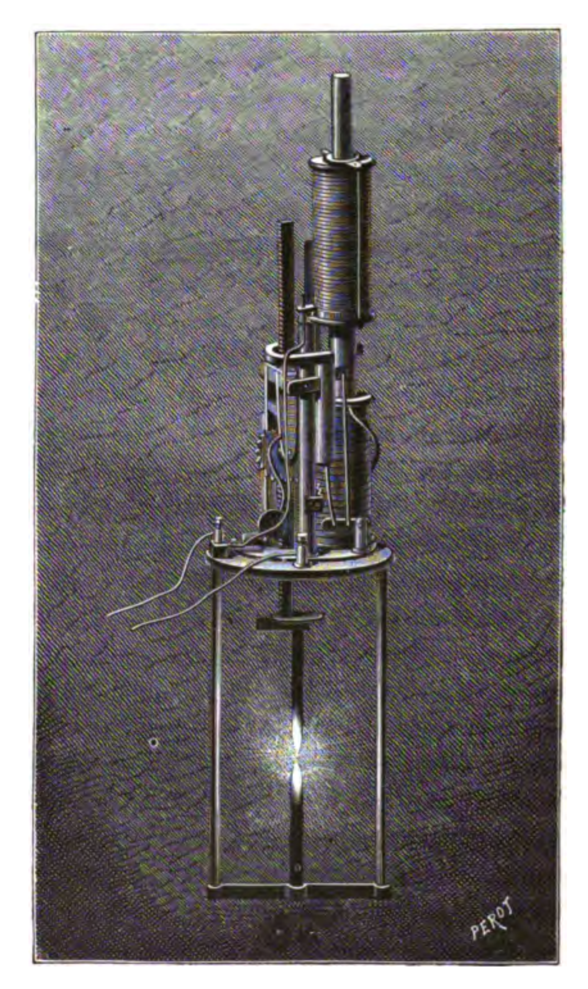


Fig. 54. — Lampe différentielle de M. Siemens.

ple, mais par les variations de résistance de l'arc voltaïque.

Tel est le principe de l'appareil représenté sous la forme pratique (fig. 54). L'action prépondérante de la bobine T a pour effet de faire déclancher un petit encliquetage qui permet au

charbon supérieur de descendre par son propre poids. Pour que cette descente de charbon se fasse lentement et régulièrement, il y a une sorte de petit balancier de pendule qui ne permet que l'échappement d'une dent par oscillation, et comme on peut arrêter la descente à chaque cinquième d'oscillation de ce petit pendule, il en résulte que les mouvements sont absolument imperceptibles et ne nuisent en rien à la fixité de la lumière.

Pour que les mouvements du noyau de fer soient plus doux, et pour qu'il ne vibre pas sous l'action des courants alternatifs, il est relié à une petite pompe à air, qui a pour effet de rendre ses mouvements *plus gras*. Lorsque l'écart des charbons se produit, le mécanisme est soulevé avec le charbon supérieur, jusqu'à ce que la distance des pointes corresponde à celle pour laquelle l'appareil est réglé. Ce réglage se fait très facilement, sans ressort antagoniste, en élevant plus ou moins la bobine à fil fin pour varier son action.

Le charbon inférieur étant *fixe*, il s'en suit que le point lumineux descend au fur et à mesure de l'usure des charbons, mais comme le mécanisme est placé tout entier *au-dessous* du point lumineux, il n'y a point d'ombre portée par le socle de l'appareil, et ce déplacement ne présente pas d'inconvénient dans ces conditions, surtout lorsque la lampe est placée un peu haut; le mécanisme est caché dans une enveloppe cylindrique en cuivre qui le préserve et sert à le suspendre.

On peut éteindre une lampe sans que les autres en soient affectées ; il suffit pour cela d'introduire une *clef* dans le communicateur, ce qui a pour effet d'établir nne *communication directe :* en enlevant la clef, la lampe éteinte se rallume aussitôt.

Signalons encore une disposition simple et ingénieuse :

La crémaillère du porte-charbon mobile porte une petite traverse qui, lorsque cette crémaillère est au bout de sa course, vient s'appuyer sur deux petits contacts en platine reliés aux bornes et établit automatiquement une communication directe. Cela a pour but de ne pas laisser s'éteindre toutes les lampes

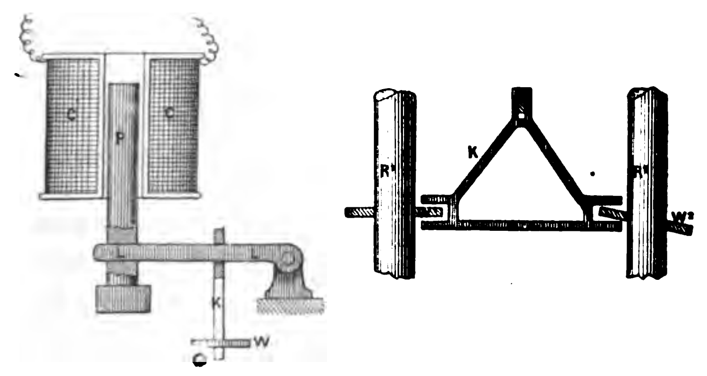
d'un même circuit lorsque les charbons de l'une d'elles sont usés et qu'on a oublié de les remplacer à temps. Une machine à lumière à 16 bobines dépense, avec son excitatrice, une force d'environ dix chevaux et alimente vingt lampes d'une puissance d'environ vingt-cinq becs Carcel chacune.

Régulateur Brush. — Il est aussi, comme la lampe de Siemens, fondé sur le principe de l'action différentielle : seulement, au lieu d'employer deux bobines séparées, M. Brush se sert d'un solénoïde à deux fils, l'un court et gros placé sur *le même circuit* que l'arc voltaïque, l'autre long et fin placé *en dérivation* sur l'arc lui-même. Le charbon supérieur descend par son propre poids jusqu'au contact du charbon inférieur, qui est fixe. Le mécanisme est placé à la partie supérieure, ce qui dégage le point lumineux. Au moment où il y a contact entre les charbons, le courant passe en totalité dans le gros fil, le solénoïde C (fig. 55) devient très puissant; il attire, il aspire le noyau P, qui, par l'intermédiaire des leviers L et R, vient soulever une bague W qui relève, en le coinçant, le porte-charbon R′, et forme l'arc. Mais à mesure que l'arc s'allonge, il passe une plus grande partie du courant dans le fil fin en dérivation; comme son action sur le solénoïde est de sens inverse à celle du gros fil, elle affaiblit sa puissance, et bientôt il s'établit un état d'équilibre correspondant à la longueur normale de l'arc.

Si l'arc tend à s'allonger encore, l'action du gros fil, qui est prépondérante sur celle du fil fin, diminue encore, la bague W laisse glisser légèrement le porte-charbon, l'arc se raccourcit; si le glissement a été trop grand, le solénoïde soulève le noyau P, et l'arc s'allonge un peu pour reprendre sa longueur normale, et ainsi de suite. Pratiquement, la tige supérieure glisse lentement dans la rondelle, au fur et à mesure de la consommation du charbon, et le mouvement de cette tige est rendu assez lent parce que l'extrémité supérieure du porte-charbon porte un petit piston glissant à frottement doux dans un cylindre rempli de glycérine, pour rendre ses mouvements plus *gras* et moins brusques.

La lampe à un seul charbon, disposée comme nous venons de le dire, peut brûler huit heures. Dans la Cité, où l'éclairage dure toute la nuit, on fait usage de la lampe à deux charbons, et sa durée est ainsi portée à seize heures. Lorsque la première paire de charbons est brûlée, la seconde paire la remplace automatiquement jusqu'à ce qu'elle soit consumée à son tour.

Les figures 55 et 56 montrent comment cet effet se produit. Dans la lampe à double charbon, le noyau P soulève ou abaisse le petit bâti K par l'intermédiaire du levier L. R_1 et R_2 sont les tiges porte-charbons, et W^1 et W^2 les bagues qui les entourent.



Régulateur Brush.

Fig. 55. — Solénoïde à deux fils du régulateur Brush.

Fig. 56. — Disposition des changements de charbon dans la lampe double.

Lorsque le bâti s'élève, les bagues sont soulevées obliquement, mais, comme l'une des mâchoires est établie un peu plus haut que l'autre, il en résulte qu'elle commence à agir la première et relève son charbon plus haut que son voisin. Un seul arc s'établit entre les charbons les plus rapprochés; l'alimentation et le réglage se portent sur la paire de charbons où l'arc s'est formé primitivement, parce que, bien que les mouvements des deux paires de charbons soient solidaires, la seconde paire est toujours plus élevée que la première. Lorsque le porte-charbon de la première paire est arrivé au bas de sa course, l'arc s'allonge, et, à un moment donné, le courant ne peut plus passer

que par les charbons de la seconde paire, qui viennent en contact, et se règlent ensuite exactement comme la première paire.

A chaque nouveau rallumage, il se produit donc une certaine variation dans la résistance du circuit; mais, comme elle ne porte que sur 1/16e ou 1/32e, et même 1/40e de la résistance du circuit total, l'éclat des autres foyers n'en est pas sensiblement affecté.

Signalons aussi un mécanisme ingénieux qui, en cas d'accident dans une lampe, établit automatiquement une communication directe entre ses bornes et empêche ainsi l'interruption du circuit, ce qui amènerait l'extinction de toutes les lampes de la série.

L'ensemble du système fonctionne d'une façon régulière et fournit une lumière très fixe et d'une intensité variant entre 60 et 90 becs Carcel par foyer. Il est d'une installation simple et économique, mais l'emploi d'un aussi grand nombre de foyers sur un même circuit est sujet à de graves objections.

En s'en tenant comme limite extrême au circuit de seize foyers, on se placerait, à notre avis, dans des conditions moins dangereuses, tout en faisant une large part à la question d'économie, qui paraît avoir surtout guidé M. Brush dans l'ensemble et les détails de son ingénieux système.

Régulateurs différentiels divers. — Dans le système de M. *Weston*, on retrouve l'électro à double fil et la tige glissante relevée par coincement, comme dans le régulateur Brush. Les qualités de fixité et de simplicité sont à peu près équivalentes.

Dans une disposition imaginée par M. *Tchikoleff* et appliquée depuis l'année 1877, dans l'artillerie russe, le système de réglage se compose d'un anneau de Gramme placé entre deux électro-aimants formant champ magnétique. L'un d'eux, à gros fil, est traversé par le courant général, l'autre à fil fin, par un courant délivré, l'anneau peut tourner dans un sens ou dans l'autre suivant que l'un des électro-aimants a une action prépondérante, puisque, par leurs polarités, ils tendent à empêcher l'anneau de tourner lorsque leur puissance est égale. Ce double mouvement de rotation est utilisé pour produire l'écart ou le rappro-

chement des charbons, avec cet avantage que les mouvements sont d'autant plus rapides que l'appareil est plus éloigné de sa position d'équilibre.

Le régulateur de M. Tchikoleff fonctionne avec des courants continus, sans mécanisme d'horlogerie, ni ressorts antagonistes.

Citons encore le régulateur *Shuckert* identique à celui de M. Tchikoleff, celui de M. *Berjot*, analogue au différentiel de Siemens et fonctionnant avec des courants alternatifs, ceux de MM. *Gravier*, *Crompton*, etc.

b. — Régulateurs à dérivation.

Dans ces appareils, le réglage s'effectue sous l'influence des variations de résistance de l'arc et, par suite, du courant qui traverse un électro-aimant ou un solénoïde établi en *dérivation* sur les bornes de la lampe.

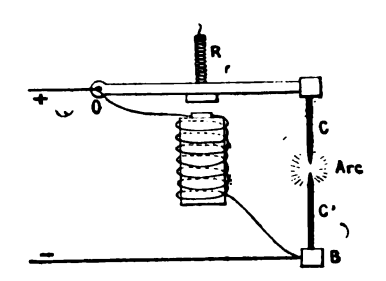


Fig. 57. — Principe des régulateurs à dérivation.

Le diagramme de la figure 57 permet d'en saisir le principe. On voit, en étudiant la marche des courants, que l'électro *augmente* de puissance lorsque l'arc *s'allonge*, il tend alors à rapprocher les charbons. C'est l'inverse de ce qui se produit dans les monophotes pour lesquels l'électro *augmente* de puissance lorsque l'arc *se raccourcit*.

M. Tchikoleff a appliqué pour la première fois la dérivation à un régulateur Foucault. Le ressort antagoniste était remplacé par un électro-aimant à fil très fin monté en dérivation.

Les armatures des deux électro-aimants étaient placées aux deux extrémités d'une bascule portant un levier de déclanchement des mécanismes de rapprochement ou d'éloignement des charbons.

Il y avait équilibre lorsque la résistance de l'arc était normale.

Si l'arc s'allongeait, sa résistance augmentait, l'action de la

bobine à fil fin devenait prépondérante et, en faisant basculer l'armature, déclanchait le mouvement de rapprochement des charbons. L'effet inverse déclanchait, au contraire, le mouvement d'écartement.

Régulateur de M. Lontin. — Dans l'appareil de M. Lontin, à l'inverse du régulateur Serrin, la palette de l'électro-aimant est disposée pour que la lampe soit toujours embrayée, et le débrayage ne se produit que si l'arc atteint une trop grande longueur, car alors le courant passant dans la dérivation devient plus intense, attire son armature, et débraye le mouvement de rapprochement des charbons. Dans d'autres modèles, l'électro-aimant est remplacé par un solénoïde, ce qui ne change rien au principe, mais empêche les vibrations de l'armature lorsqu'on emploie des courants alternatifs.

L'appareil de M. Lontin a permis de placer sur un circuit unique jusqu'à douze régulateurs en tension. Avec une seule machine Lontin à division, on a pu alimenter jusqu'à trente et un régulateurs fondés sur ce système, et disposés sur différents circuits convenablement distribués, grâce au *manipulateur* dont nous avons parlé page 77.

Régulateur de M. de Mersanne. — Ce régulateur a été combiné pour permettre d'obtenir une lumière de seize heures au moins en employant de très longs charbons, tout en n'intercalant dans le circuit qu'une partie de leur longueur, pour ne pas augmenter inutilement la résistance.

Les charbons sont entraînés par un mouvement d'horlogerie qui sert à la fois à l'écart et au rapprochement des charbons.

Lorsque l'arc tend à s'allonger, il passe une plus grande partie du courant dans un électro-aimant placé en dérivation, l'armature déclanche le mouvement d'horlogerie qui provoque le rapprochement des charbons jusqu'à ce que la résistance de l'arc soit revenue à sa valeur normale.

Le mouvement d'écartement nécessaire pour la formation de l'arc est obtenu par un second électro-aimant établi dans le même circuit de dérivation qui n'agit que lorsque le courant

passe tout entier dans cette dérivation, soit par la rupture de l'arc, soit parce que l'arc ne s'est pas formé. Au moment où le courant est envoyé dans l'appareil, tout le courant passe dans les électro-aimants de dérivation, le premier laisse défiler le mouvement d'approche, le second attire son armature et tend à rapprocher l'un des charbons. Lorsque les deux charbons sont en contact, les électro-aimants de dérivation deviennent à peu près inertes, la plus grande partie du courant passant par l'arc ; ils lâchent leurs armatures ; celle du premier arrête le défilement des charbons, celle du second produit l'écart sous l'action d'un ressort antagoniste.

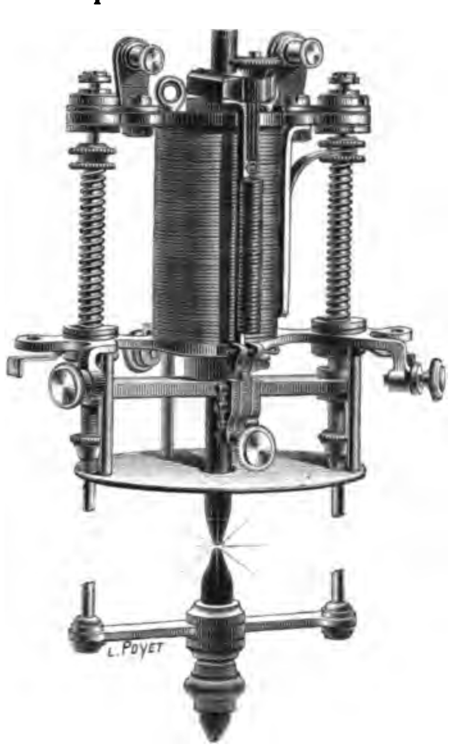


Fig. 58. — Régulateur à dérivation de M. Anatole Gérard.

Régulateur de M. Gérard. — Le régulateur de M. *A. Gérard* est disposé au-dessus des charbons et fonctionne avec des courants alternatifs. Il se compose d'un cadre (fig. 58) formé par deux tiges verticales et des traverses qui supportent un électro-aimant à une seule branche, dont le noyau est creux pour laisser passer librement le charbon supérieur. Cet électro-aimant est à fil fin et est monté *en dérivation* sur les bornes de la lampe. Un frein articulé portant une vis, qui appuie sur le charbon, le maintient et l'empêche de descendre ; l'effort du frein contre le charbon se règle en tendant plus ou moins un ressort de réglage. Ce frein porte une armature à la partie

supérieure, et, lorsque cette armature est attirée, le frein dégage le charbon et le laisse descendre.

Le charbon inférieur est supporté par un cadre vertical mobile dont la partie supérieure porte une armature placée à l'extrémité inférieure de l'électro-aimant. Ce cadre mobile est équilibré par deux ressorts en spirale qu'on voit à droite et à gauche de l'électro-aimant. Au repos, les charbons *ne sont pas en contact.*

Voici maintenant comment fonctionne l'appareil : Lorsque le courant est envoyé dans la lampe, les charbons sont écartés, il ne peut donc passer que par le fil fin. L'électro-aimant devient alors très puissant, il attire les deux armatures supérieure et inférieure. L'armature supérieure, agissant sur le frein, dégage le charbon supérieur et le laisse descendre. L'armature inférieure soulève le cadre et le charbon inférieurs. Dès qu'il y a contact des deux charbons ainsi sollicités à se rapprocher, l'arc s'établit et le courant qui passe dans la dérivation s'affaiblit dans une grande mesure. L'armature inférieure retombe, fait descendre le charbon inférieur et produit l'écart nécessaire. D'autre part, l'armature inférieure du frein est en partie relâchée, et la vis vient presser contre le charbon supérieur et l'empêcher de descendre.

Si le ressort est convenablement réglé, il y a équilibre ; mais, à mesure que les charbons s'usent, l'arc tend à s'allonger, et la puissance du courant dans l'électro-aimant en dérivation augmente.

Le frein se trouve donc desserré de plus en plus et par suite du frémissement de l'armature dû aux courants alternatifs, le charbon supérieur glisse imperceptiblement d'une façon continue pour maintenir l'écart convenable.

Régulateur de M. Gramme. — Dans cet appareil, le porte-charbon inférieur est fixe, le point lumineux mobile, et le mécanisme placé à la partie supérieure dans une envoloppe métallique cylindrique.

Le mécanisme comprend deux parties distinctes : l'une assure l'avancement progressif des charbons, l'autre le recul pour la

formation de l'arc. L'électro-aimant à gros fil AA (fig. 60), placé

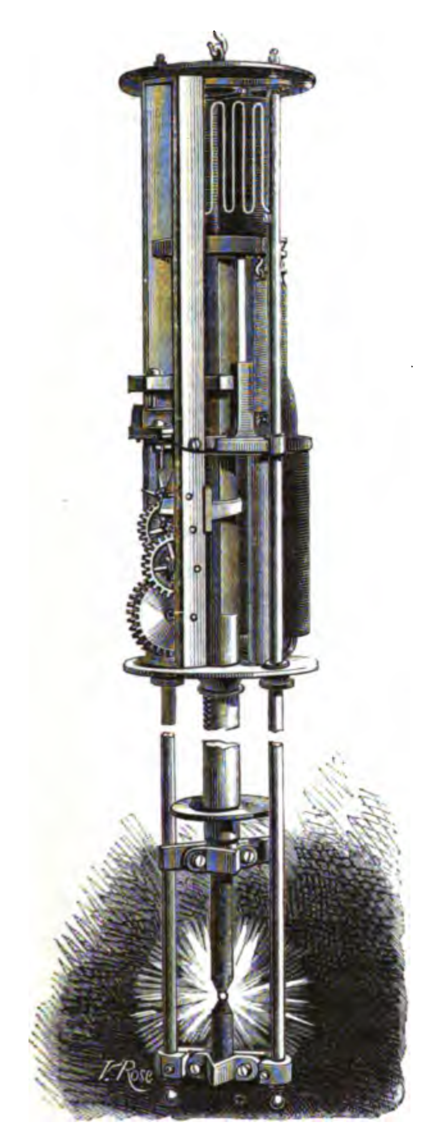


Fig. 59. — Vue d'ensemble du régulateur de M. Gramme.

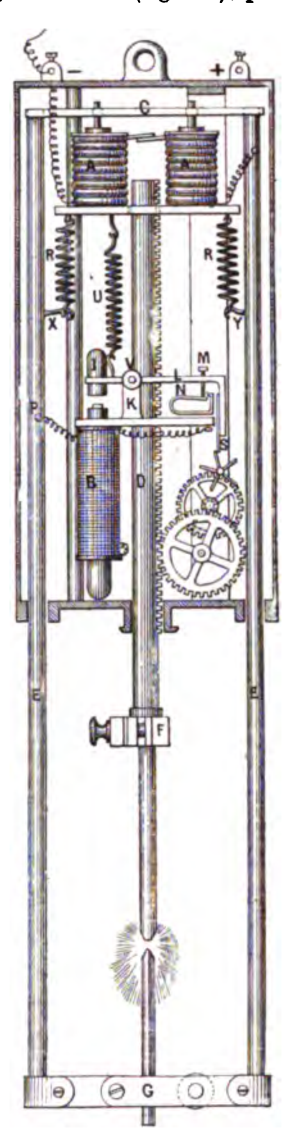


Fig. 60. — Diagramme du régulateur de M. Gramme.

dans le circuit de l'arc voltaïque, est fixé aux entretoises de

l'enveloppe ; son armature C supporte les tiges E, qui traversent tout le régulateur et se prolongent jusqu'au porte-charbon inférieur G. Deux ressorts RR maintiennent l'armature C éloignée de AA lorsque le courant ne passe pas. Ce mécanisme constitue le mouvement d'écartement des charbons pour la formation de l'arc.

Le mouvement d'avancement des charbons est produit par la tige D, très pesante, qui agit par son poids comme moteur ; cette tige, dentée d'un côté, soutient le porte-charbon supérieur F. Un électro-aimant fixe B, à grande résistance, monté en dérivation sur l'arc, agit sur une armature I reliée à un levier L, dont le point d'oscillation est en K.

Un ressort U règle la résistance de l'armature à l'action de l'électro-aimant, et une petite tige S, fixée au levier L, embraye le mouvement d'horlogerie et, par suite, empêche la descente du charbon supérieur tant que l'armature I n'est pas attirée. Une vis M fixée sur le levier L, et un ressort N placé sur une pièce K isolée électriquement des autres organes, complète le mécanisme. Voici maintenant comment fonctionne l'appareil.

Au repos les charbons se touchent, les armatures C et I sont éloignées de leurs électros respectifs. Au moment où l'on envoie le courant, l'électro AA attire C, l'écart des charbons se produit, et l'arc s'allume. Il ne passe dans l'électro B qu'une partie du courant. Tant que l'arc conserve sa longueur normale, les pièces du mécanisme conservent cette position relative. Lorsque l'arc s'allonge, par suite de l'usure des charbons, l'intensité du courant qui traverse la dérivation, c'est-à-dire l'électro B, devient plus grande ; à un moment donné son attraction sur I est plus grande que l'action du ressort antagoniste U ; le levier L bascule, la lame S dégage les engrenages, le porte-charbon supérieur descend et l'arc se raccourcit.

La vis M quitte alors le ressort N, le courant cesse de traverser l'électro B. L'armature I, sollicitée par le ressort U, reprend sa position horizontale ; le contact de la vis M et du ressort N s'opère de nouveau, et ainsi de suite, jusqu'à ce que l'arc ait repris sa longueur normale.

Veilleur automatique. — Le veilleur automatique est un appareil ayant pour but de rétablir instantanément et automatiquement le circuit général, pour empêcher l'extinction de toutes les autres lampes de la même série, lorsque, pour une raison quelconque, une lampe est mise hors de service pour un temps plus ou moins long, accidentellement ou volontairement. Il se compose d'une planchette de bois sur laquelle est fixé un électro-aimant à fil fin, relié aux deux bornes supérieures qui sont reliées elle-mêmes à la lampe, c'est-à-dire monté en dérivation. Les deux bornes inférieures (fig. 61) communiquent avec deux godets en fer à moitié remplis de mercure, la borne de gauche est reliée au fil d'entrée et la borne de droite au fil de sortie du courant.

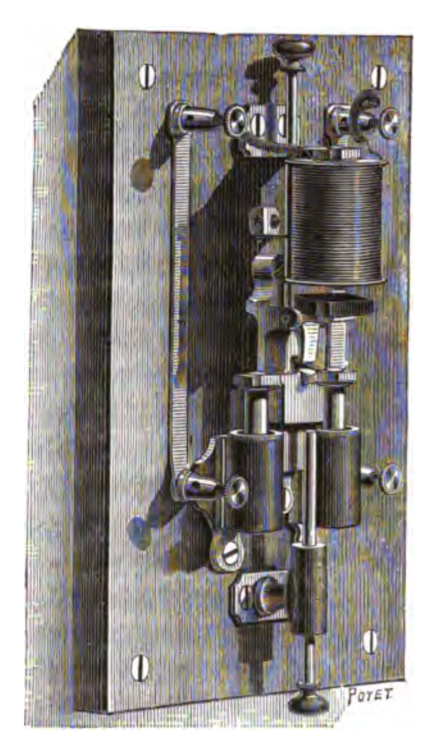


Fig. 61. — Veilleur automatique de M. Anatole Gérard.

Au-dessous de l'électro-aimant droit se trouve une armature portant un petit crochet auquel se trouve suspendu, par un second crochet, une traverse supportant deux tiges en fer, placées juste au-dessous des godets à mercure. Lorsque le courant passe dans la lampe, l'électro-aimant en dérivation du veilleur ne reçoit pas assez de courant pour attirer son armature. Lorsque le courant ne traverse plus la lampe, en cas d'accident, par exemple, l'électro-aimant devient assez puissant pour attirer son armature qui bascule, dégage les crochets, et laisse tomber les tiges en fer dans les godets à mercure; il s'établit

alors une communication directe, la lampe se trouve mise hors du circuit (1), qui reste ainsi complet.

L'appareil aussi simple qu'ingénieux, fonctionne d'une façon parfaite. Dans le modèle établi salle XVI, à l'Exposition d'électricité, M. A. Gérard avait disposé les godets l'un au-dessus de l'autre. Le principe reste le même, mais les appareils ont moins de largeur et se placent plus facilement sur les colonnes souvent étroites des ateliers et des usines, pour lesquels la lampe de M. A. Gérard et son veilleur automatique nous paraissent plus particulièrement appropriés.

LAMPES ÉLECTRIQUES A ÉCART FIXE.

On peut comparer un foyer électrique à une turbine. La turbine, pour bien fonctionner, doit recevoir un certain volume d'eau par seconde avec une pression déterminée. Un foyer électrique, pour bien fonctionner, doit aussi être traversé par un courant d'un volume déterminé sous une *pression* ou différence de potentiel déterminée.

Dans les régulateurs *monophotes*, on s'attache à maintenir la constance du *volume* ou de l'intensité du courant qui traverse le conducteur.

Dans les régulateurs *différentiels*, on maintient toujours un certain rapport entre le volume débité et la pression, c'est-à-dire entre l'intensité et la différence de potentiel aux bornes de la lampe.

Dans les régulateurs *à dérivation*, le réglage se porte seulement sur la *pression* ou différence de potentiel aux bornes qu'on s'efforce de maintenir constante, quelle que soit l'intensité du courant qui traverse l'arc. Aussi ce dernier système est-il celui

(1) Au point de vue strict, la lampe n'est pas mise hors de circuit, mais par suite de la communication directe établie entre les deux bornes inférieures par les godets à mercure, elle ne reçoit plus qu'un courant *pratiquement nul*.

qui présente le plus d'élasticité et qui s'accommode le mieux aux variations de débit du générateur électrique qui l'alimente.

Faisons remarquer en passant que tous les régulateurs à division, différentiels ou à dérivation, peuvent fonctionner en *monophotes*, mais que la réciproque n'est pas vraie. La tendance générale actuelle est de transformer les appareils monophotes en régulateurs à division, même lorsqu'on ne doit alimenter qu'un seul foyer par machine. MM. Serrin et Jaspar étudient en ce moment le réglage par dérivation de leurs régulateurs, et M. Crompton l'applique aussi à ses derniers modèles.

Il nous reste maintenant à parler d'une dernière classe de régulateurs, ou plutôt de *lampes* électriques dans lesquelles le réglage est totalement supprimé. On s'attache seulement à maintenir une *distance géométrique constante* entre les deux pointes de l'arc, quels que soient la pression et le volume du courant.

Les appareils à écart fixe ne disposant pas de moyens de réglage exigent une plus grande constance de la source électrique puisqu'ils ne peuvent pas se plier à ses variations; ils donnent aussi, en général, une lumière moins fixe et moins belle que les régulateurs. Par suite des perfectionnements et des simplifications apportés chaque jour aux régulateurs, les appareils à écart fixe perdent de leur importance. Nous en décrirons seulement quelques types intermédiaires entre les régulateurs que nous venons d'examiner et les bougies dont nous parlerons dans le chapitre suivant.

Lampe de M. Brockie. — La lampe de M. *Brockie* est aussi un régulateur à division dans lequel on réajuste la distance des charbons toutes les minutes ou toutes les demi-minutes en interrompant le circuit automatiquement pendant une petite fraction de seconde. Au moment de l'interruption, l'électro-aimant qui maintenait les charbons devient inerte, le charbon supérieur retombe au contact, et lorsqu'on envoie le courant de nouveau, l'électro-aimant les replace à la distance normale et les maintient immobiles jusqu'au réajustage suivant. L'éclipse est de si courte durée qu'elle est presque imperceptible et l'u-

sure des charbons si faible entre deux réajustages successifs qu'elle n'influe pas sensiblement sur la résistance du circuit et par suite sur l'intensité du courant qui le traverse.

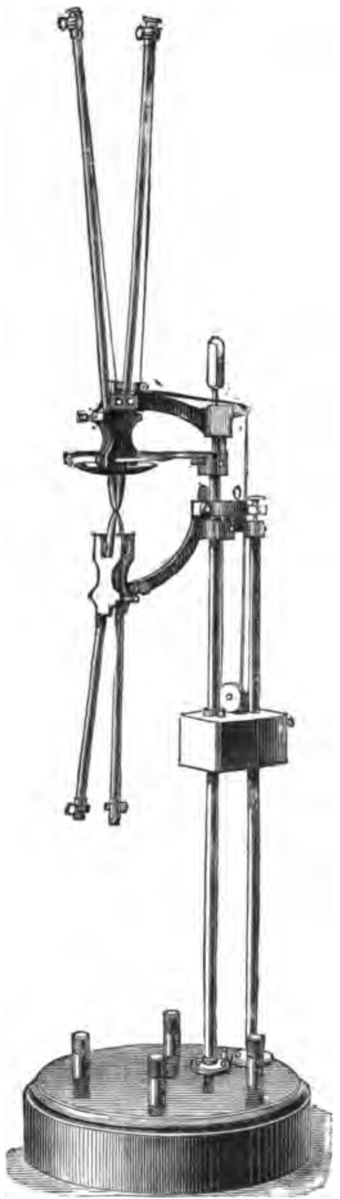


Fig. 62. — Lampe électrique de M. Rapieff.

Dans une nouvelle disposition, l'électro-aimant de réajustage n'est pas établi sur le circuit même ; il est alimenté par un circuit auxiliaire branché en dérivation sur la lampe, et c'est seulement sur ce circuit que portent les interruptions de courant.

Lampe Rapieff. — La lampe de M. *Rapieff*, imaginée en 1878, se compose de quatre charbons disposés deux à deux pour chaque pôle (fig. 62).

Le pôle supérieur est constitué par deux charbons de 6 millimètres de diamètre glissant entre des galets qui les guident en établissant un parfait contact électrique. Ces deux charbons forment une sorte de V dont la longueur diminue avec la combustion, mais dont le point de rencontre est fixe. Une combinaison très simple de ficelles dont on voit la disposition sur la figure 62 transmet l'action d'un poids à ces charbons et les sollicite à descendre ; la rencontre des pointes détermine l'arrêt et fixe le point lumineux.

Le pôle inférieur forme un V renversé disposé dans un plan per-

pendiculaire au plan des deux charbons du pôle supérieur. On retrouve la même disposition de galets et de ficelles qui sollicitent les charbons à remonter et à constituer par leur rencontre un second point fixe par rapport à leur support. Ce support articulé au point O permet de produire un écart convenable des charbons au moment où le courant passe. Pour obtenir ce résultat, M. Rapieff dispose dans le socle un électro-aimant plat à deux branches dont l'une est fixe et l'autre articulée à l'une de ses extrémités. Au moment où le courant passe, les pôles de noms contraires s'attirent, et le déplacement de la branche in-

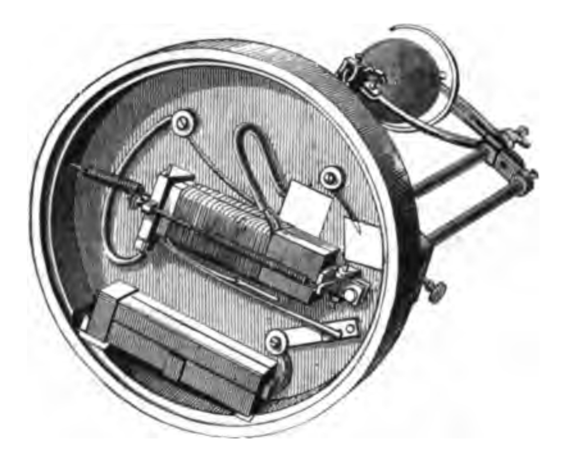


Fig. 63. — Lampe Rapieff (socle de l'appareil).

férieure mobile de l'électro-aimant réagit sur une tige placée dans un des montants verticaux de l'appareil et exerce une *traction* sur le support des charbons inférieurs articulé en O ; il en résulte l'écartement des charbons primitivement au contact et, par suite, la formation d'un arc voltaïque dont on règle la longueur en contre-balançant l'action de l'électro-aimant par un ressort en spirale convenablement tendu à l'aide d'une vis de réglage (fig. 62). Par cette disposition très simple, on obtient une lampe électrique dont le point lumineux reste toujours fixe dans l'espace, dont la longueur des charbons est illimitée, et dans laquelle la résistance que ces charbons introduisent dans le circuit

est très faible et indépendante de leur longueur. Dans une autre disposition, M. Rapieff remplace les deux charbons du pôle supérieur par un seul charbon, mais plus gros. Dans cette *lampe à trois charbons*, le rôle de l'électro-aimant est renversé, il ne sert plus qu'à produire un rapprochement des charbons pour l'allumage ; lorsque la lampe est allumée, cet électro-aimant devient inactif, l'arc a alors une longueur *constante*, réglée à l'avance et qui dépend seulement du nombre d'appareils introduits dans le circuit.

Lampe de M. A. Gérard. — M. *A. Gérard*, dont nous avons déjà décrit le régulateur à dérivation, a imaginé aussi une lampe à écart fixe analogue à la lampe Rapieff, mais qui s'en distingue par le mode de rallumage employé. Les quatre charbons, disposés par groupes de deux, sont placés *au-dessus* du point lumineux, et descendent par leur propre poids sans l'intermédiaire de ficelles. Un électro-aimant à fil très fin monté *en dérivation* sur le circuit de la lampe produit le rapprochement des charbons nécessaire à l'allumage, car, au moment où on envoie le courant dans tout l'appareil, les charbons sont séparés, le courant passe tout entier dans l'électro-aimant ; mais, une fois l'allumage produit, l'électro-aimant devient inactif, car il ne reçoit qu'une portion très faible du courant.

Régulateurs divers. — Nous avons dû passer sous silence un grand nombre de régulateurs, quelques-uns très ingénieux dans leur principe, mais que la pratique n'a pas sanctionnés ou qui n'ont pas encore eu le temps de faire leurs preuves.

MM. *Wallace* et *Farmer* ont combiné un appareil à électrodes plates donnant une très longue durée d'éclairage sans renouvellement des charbons, mais présentant le même inconvénient que les régulateurs à disques circulaires aujourd'hui abandonnés.

MM. *Moléra* et *Cébrian* ont construit des régulateurs dans lesquels les transmissions de mouvement sont hydrauliques.

D'autres, comme M. *de Fonvielle*, et bien avant lui M. *J. van Malderen*, mettent à profit la répulsion réciproque des électrodes sous l'action du courant qui le traverse, mais alors l'appareil est

trop délicat et ne supporte pas le plus petit mouvement, car la répulsion étant très faible, l'équilibre est des plus instables, etc.

Il est peu d'inventions dans lesquelles il ait été dépensé autant d'ingéniosité que dans les régulateurs électriques; il y a eu pour cela, comme pour bien d'autres choses, beaucoup d'appelés et peu d'élus. C'est aux élus, — et un peu aussi. aux éligibles, — que nous avons consacré l'espace dont nous disposions.

Tous les régulateurs que nous avons examinés fonctionnent ou tout au moins peuvent fonctionner soit avec des courants continus, soit avec des courants alternatifs. Dans l'application cependant, l'emploi de l'une ou de l'autre nature de courants entraîne quelques modifications de détail dans la forme des appareils, le fil des électro-aimants, etc., sans changer le principe. Il nous reste maintenant à examiner une classe d'appareils dans lesquels on fait usage presque exclusivement des courants alternatifs : ce sont les *bougies* électriques.

CHAPITRE II

LES BOUGIES ÉLECTRIQUES

On donne le nom de *bougie électrique* à tout appareil à arc voltaïque dans lequel les charbons sont placés *parallèlement*, au lieu d'être mis bout à bout.

En 1846, *William-Edwards Staite* combina un appareil dans lequel les deux charbons étaient placés obliquement (appareil de transition entre le régulateur et la bougie). En 1874, M. *Werdermann* fit breveter une sorte de bougie électrique destinée à percer le rocher dans les travaux de mine et les tunnels, mais qui n'était pas destinée à produire la lumière électrique.

Mais la véritable bougie électrique, celle qui, par l'absence complète de mécanisme et son extrême simplicité a obtenu le succès que l'on sait, est due à un officier de l'armée russe, M. *Jablochkoff*, et date de 1876.

Bougie Jablochkoff. — Voici d'abord un extrait du brevet qui caractérise nettement l'invention de M. Jablochkoff.

« Mon invention consiste dans la suppression absolue de tout « mécanisme ordinairement employé dans les lampes électriques. « Au lieu de réaliser mécaniquement le rapprochement automa- « tique des charbons, au fur et à mesure de leur combustion, je « fixe ces charbons l'un contre l'autre en les séparant par une « substance isolante, susceptible de se consumer en même temps « que lesdits charbons, le kaolin par exemple. Les deux char-

« bons ainsi préparés peuvent se placer dans un chandelier spé-
« cial et il suffit de les faire traverser par le courant d'une source
« électrique quelconque, pour qu'un arc voltaïque prenne nais-
« sance d'une extrémité à l'autre ; pour l'allumage, je réunis les

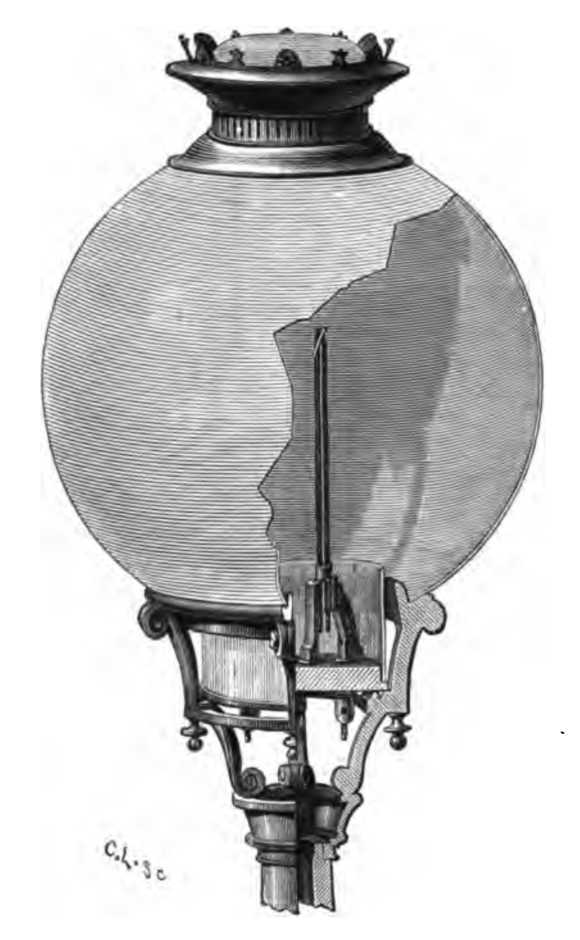


Fig. 64. — Bougie Jablochkoff. (Globes de l'avenue de l'Opéra.)

« deux extrémités libres par une petite bande de charbon qui
« rougit d'abord, et sert d'amorce à l'arc voltaïque. »

Il en résulte que les charbons brûlent côte à côte et s'usent en même temps, comme la mèche d'une bougie stéarique.

La matière isolante a pour but de maintenir l'arc à l'extrémité de la bougie, cette matière isolante se volatilisant à mesure de la combustion du charbon.

On sait que, dans l'arc voltaïque, le charbon positif brûle deux fois plus vite que le pôle négatif. M. Jablochkoff a essayé de remédier à cet inconvénient, qui produirait rapidement l'extinction, à cause de la dénivellation des pointes, en donnant au crayon positif une section double de celle du crayon négatif, mais la pratique n'a pas sanctionné cette méthode : aujourd'hui toutes les bougies Jablochkoff ont leurs deux charbons d'égal diamètre et sont alimentées *exclusivement* par des machines à courants alternatifs.



Fig. 65. — Chandelier à quatre bougies.

La figure 64 représente la bougie Jablochkoff sous sa forme actuelle : les deux crayons parallèles ont un diamètre de 4 millimètres et 25 centimètres de longueur, ce qui assure aux bougies une durée moyenne de deux heures. Les charbons sont emmanchés, à leur partie inférieure, dans deux petits tubes de laiton de 5 centimètres de longueur séparés par une matière isolante. Ces bougies sont disposées au nombre de quatre dans un globe diffusant que représente la même gravure (fig. 65), adoucissant la lumière et lui donnant l'aspect d'une grande masse lumineuse, sans que l'œil puisse voir le point précis d'où part la lumière.

On emploie aussi le *verre craquelé*, qui est moins diffusant, mais qui absorbe une moins grande quantité de lumière, et le verre *strié*.

Les quatre bougies sont disposées aux quatre angles d'un carré dans des pinces à ressort B, C (fig. 65) dont les branches isolées sont reliées aux conducteurs électriques.

Un commutateur placé à portée de la main et renfermé dans une boîte, à l'abri des indiscrétions des passants, sert à faire passer le courant d'une bougie presque consumée dans une bougie neuve. Lorsque le globe renferme quatre bougies, il suffit de cinq conducteurs dont les quatre premiers sont reliés chacun à une bougie et le cinquième forme le fil de retour commun.

Par un mouvement rapide du commutateur, on passe d'une bougie à l'autre sans que l'interruption momentanée du circuit trouble d'une manière appréciable la lumière des autres bougies du même circuit.

Les deux charbons étant isolés, il est indispensable, pour l'allumage, qu'il y ait une communication préalable pendant quelques instants des deux pointes de la bougie.

Au début, M. Jablochkoff allumait directement sa bougie en appuyant sur les deux extrémités un morceau de charbon qu'il enlevait ensuite lorsque l'arc était formé.

Pour pouvoir allumer à distance, M. Jablochkoff a mis d'abord entre les deux charbons un morceau de mine de crayon, maintenue par un petit ruban ou un papier, qui établit un circuit conducteur complet.

Lorsque le courant est envoyé dans la bougie, la petite mine de crayon est chauffée, rougit et se consume ; l'arc voltaïque apparaît alors et se maintient tant que la bougie dure et que le courant électrique est assez puissant. On peut remplacer la mine de crayon par un fil métallique fin ou un morceau de plomb. Aujourd'hui, on réalise l'amorçage à l'aide d'une pâte de composition spéciale, à base de charbon, qui produit le même effet. Par ce moyen, on peut utiliser les bougies à moitié brûlées en les réamorçant.

Dans certaines applications, pour économiser les conducteurs, M. *Gadot* dispose toutes les bougies d'un chandelier en dérivation. En envoyant le courant dans l'appareil, c'est la bougie la moins résistante qui s'allume la première, et qui continue ensuite à brûler. Si la bougie se casse ou brûle jusqu'au bout, elle s'é-

teint et le courant rallume celle des bougies restantes ayant la moins grande résistance, et ainsi de suite.

L'augmentation de la conductibilité de l'isolant produite par la chaleur est si grande qu'on peut interrompre le circuit d'une bougie bien allumée pendant près de deux secondes, sans provoquer son extinction ni celle des autres bougies placées dans le même circuit. Au-delà d'un certain temps, le refroidissement supprime la conductibilité et le rallumage devient impossible à distance ; la bougie nécessite un réamorçage.

Les bougies Jablochkoff ont reçu un grand nombre d'applications, nous en examinerons quelques-unes chapitre IV. On a fait, à plusieurs reprises, des mesures directes sur le travail dépensé et la puissance lumineuse.

Pour donner une idée de cette puissance, nous citerons quelques chiffres extraits du rapport présenté en mai 1879 au *Metropolitan Board of Works* de Londres, par MM. Bazalgettes et Keates.

La première installation faite sur le quai Victoria comprenait vingt bougies alimentées par une machine de Gramme à courants alternatifs, et disposées en quatre circuits de cinq bougies chacun.

Le travail dépensé par la machine était, en déduisant le travail dépensé par la transmission et la machine fonctionnant en circuit ouvert :

				Travail total brut.		Travail net.	
Pour 5 bougies	ou	1 circuit	utilisé,	13,57	chevaux, soit	1,57	cheval par bougie
10	—	2	—	17,91	—	1,27	—
15	—	3	—	20,75	—	1,05	—
20	—	4	—	23,53	—	0,92	—

En mesurant le pouvoir lumineux, on a trouvé :

Pour une bougie à feu nu...........	39,8	becs Carcel.
— avec verre craquelé..	27,9	—
— avec globes opalins..	16,3	—

Les globes opalins font donc perdre près de 60 p. 100 de la lumière émise, et les verres craquelés, environ 30 p. 100.

Jusqu'à présent la bougie Jablochkoff est celui de tous les sys-

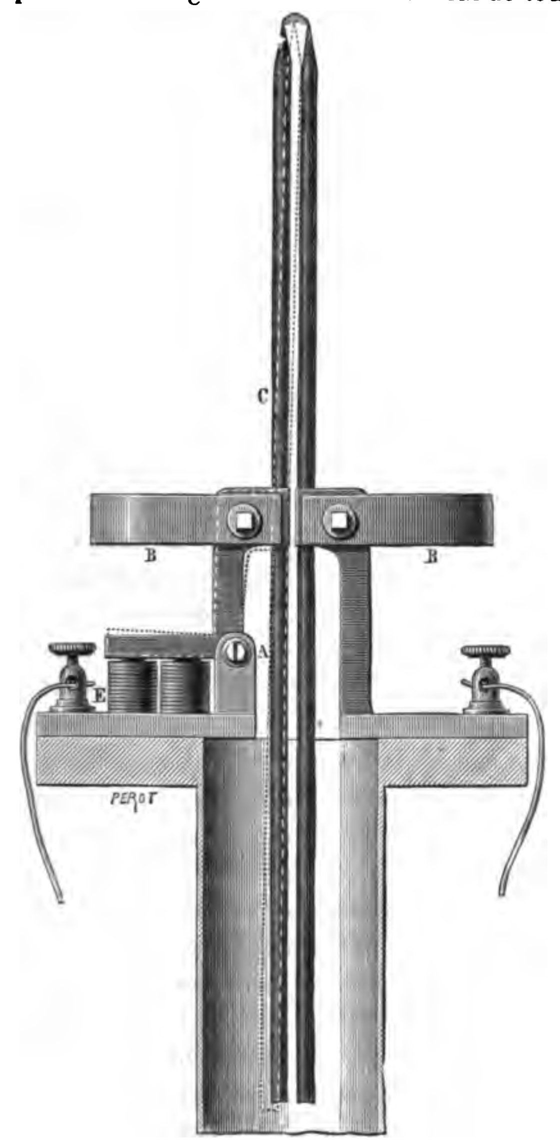


Fig. 66. — Bougie Wilde. (Demi-grandeur.)

C. Charbon mobile. — A. Axe de rotation du support du charbon mobile. — B. Ressorts des galets. — E. Electro-aimant.

tèmes d'éclairage électrique qui compte le plus grand nombre

de foyers lumineux en fonction. Ce nombre dépasse aujourd'hui 4000 et nul doute qu'avec les perfectionnements successifs qui lui sont apportés, l'abaissement très sensible du prix des machines et des bougies, il ne reçoive encore un plus grand développement.

Les seuls reproches qu'on puisse adresser à la bougie Jablochkoff sont ses changements incessants de coloration et d'éclat, et l'impossibilité de produire un rallumage automatique.

En perfectionnant la fabrication, on arrivera à atténuer le premier défaut, mais nous doutons qu'on arrive jamais à le faire complètement disparaître.

Bougie Wilde. — Nous avons vu que la bougie Jablochkoff emploie une substance isolante placée entre les deux charbons qui la composent. Dans les bougies que nous allons examiner maintenant, la matière isolante fait complètement défaut.

La bougie *Wilde* (fig. 66) se compose de deux charbons parallèles de quatre millimètres de diamètre séparés par un intervalle *vide* de 3,5 millimètres environ. Chaque charbon est fixé dans son support à l'aide d'une pince à ressort en acier plat B courbée en forme d'U (fig. 67) ; à l'extrémité du ressort est fixé un galet D qui maintient le charbon en l'appuyant contre le support M, tout en lui permettant de glisser de bas en haut.

Le charbon de droite est fixe, le support du charbon de gauche C est articulé en A ; si le courant ne traverse pas l'appareil. le charbon de gauche prend la position représentée en pointillé, le circuit se trouve donc fermé par l'électro-aimant E, les deux charbons et la borne fixée sur le support de droite, mais alors l'électro-aimant devient actif, il rappelle son armature faisant corps avec le support du charbon C qui bascule et les charbons se placent alors dans une position parallèle. Cette simple disposition réalise parfaitement l'*allumage automatique*.

Si, pour une cause quelconque, la bougie s'éteint, l'électro-aimant redevient inactif, le charbon C reprend sa position inclinée et produit le *rallumage* automatique si le circuit est complet dans toutes les autres parties du système. La bougie Wilde brûle

ainsi comme une bougie Jablochkoff sans isolant, à raison de 10 à 12 centimètres par heure, avec une puissance lumineuse variant de 20 à 80 becs Carcel, suivant l'intensité du courant qui la traverse.

Les charbons ayant une longueur de 65 centimètres représentent environ cinq heures d'éclairage, le point lumineux est, au moment de l'allumage des charbons neufs, à 20 centimètres environ des supports. Au bout d'une heure et demie environ, l'arc s'est abaissé en C par l'usure de la bougie, il suffit de venir soulever une petite rondelle placée à l'intérieur du tube à l'aide d'un bouton placé sur le côté, les charbons poussés de bas en haut glissent dans leurs supports, grâce aux galets D (fig. 67), et

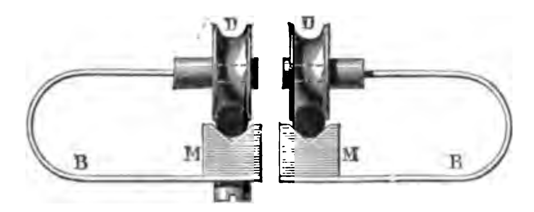


Fig. 67. — Plan des pinces à galets de la bougie Wilde.

M, coins fixes. — D, galets de cuivre. — B, ressorts.

la bougie se trouve allongée d'une nouvelle quantité. Cette manœuvre se fait très rapidement sans produire l'extinction de la bougie, et ressemble beaucoup à celle des chandeliers de cuisine dont on élève plus ou moins le point lumineux en agissant sur un petit bouton de cuivre placé sur le chandelier.

La bougie peut être *renversée*, et brûle aussi bien que dans sa position naturelle, l'usure des charbons est alors un peu augmentée dans cette seconde position. Si l'arc s'éteint, le système de M. Wilde produit un rallumage automatique ; l'extinction ne dure alors qu'un temps inappréciable.

Bougie de M. Jamin. — La première disposition de la bougie de M. *Jamin* imaginée en 1879 se composait de deux charbons plantés parallèlement dans un chandelier et entourés d'un fil dans lequel circulaient parallèlement les courants alternatifs

qui l'alimentent. Pour produire l'allumage, il suffit de toucher les deux charbons à leur extrémité par un troisième charbon qui produit l'amorçage de la bougie. Si on produit l'amorçage au milieu de la longueur des charbons, l'arc voltaïque produit en ce point se transmet avec rapidité à l'extrémité des charbons où il reste, quelle que soit la position de la bougie ; toute l'idée de M. Jamin réside dans le transport déterminé par l'action directrice des courants qui enveloppent l'appareil.

Le courant circule parallèlement dans les charbons et les fils qui l'enveloppent, c'est-à-dire que si, à un moment donné, le courant monte par le charbon de droite et descend par le charbon de gauche, il monte également par les fils de droite et redescend par ceux de gauche. L'arc voltaïque, qui n'est autre chose qu'un élément du courant, se transporte dans le sens indiqué par les lois d'Ampère.

Dans une seconde disposition de sa bougie, M. Jamin a disposé un système qui a pour effet, à cause des aimantations de sens contraire produites par les courants alternatifs, de communiquer aux charbons un mouvement oscillatoire synchrone aux passages des courants. Au repos, les charbons sont au contact et s'allument dès que le circuit est fermé.

Ce rapprochement oscillatoire des charbons permet, d'après M. Jamin, de mieux utiliser le courant alternatif qui ne peut traverser l'arc que si son intensité est suffisante pour vaincre sa résistance. En rapprochant les charbons quand l'intensité diminue, on fait traverser le courant pendant un temps plus long à chaque oscillation et l'utilisation se trouve, par ce fait, accrue dans une certaine proportion. On aurait ainsi l'avantage de faciliter la combustion du charbon par ce mouvement du charbon en favorisant la circulation de l'air. Ce mouvement vibratoire des charbons, en supposant même qu'il présente tous les avantages que lui attribue M. Jamin, a cependant l'inconvénient de produire un bruit assez intense pour rendre le brûleur gênant dans un appartement. Il ne peut donc servir que pour les rues où le bruit n'a qu'une importance secondaire. Cet inconvé-

nient se retrouve d'ailleurs, à des degrés différents, dans tous les appareils électriques qui emploient des *courants alternatifs*, ce qui constitue une supériorité en faveur des *courants continus*.

Dans la troisième disposition de la bougie de M. Jamin, nous

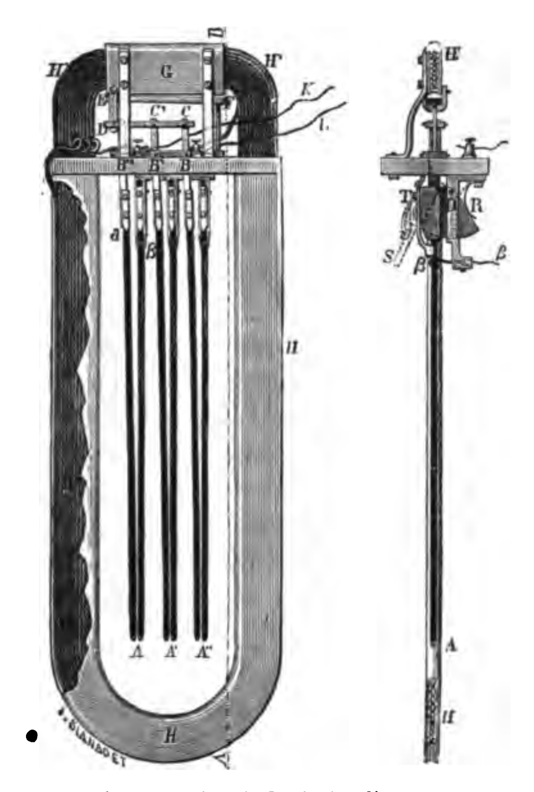


Fig. 68. — Bougie Jamin (modèle 1880).

retrouvons le rallumage de la bougie Wilde *identiquement* reproduit. L'électro-aimant G (fig. 68) sert à produire l'écart de charbons en attirant une petite armature EF au moment du passage du courant ; cette armature EF, par une combinaison de leviers ED, DC, écarte le charbon de gauche de chaque bougie A, A', A". L'arc se développe d'abord sur les trois bougies et, après quelques hésitations, se fixe sur celle des bougies qui offre

la plus petite résistance. Lorsqu'une des bougies est consommée, l'arc vient brûler un petit crochet de laiton B placé à la partie supérieure, alors, sous l'action du ressort R, le support des charbons prend la position OS, l'arc est rompu, les charbons retombent et l'allumage d'une nouvelle bougie se reproduit automatiquement. Il faut donc que les charbons soient d'une fabrication très soignée et parfaitement ajustés pour que les trois bougies puissent ainsi fonctionner chacune à leur tour et brûler jusqu'au bout sans accident.

Il y a dans le mécanisme de la bougie Jamin tous les inconvénients d'un régulateur sans les avantages correspondants, car il est impossible, avec ce système, de bien régler la résistance propre de chaque appareil pour qu'il dépense bien régulièrement le courant qui lui est fourni.

Au moment où l'arc s'allonge, il consomme plus d'énergie électrique au détriment des autres lampes, l'inverse se produit lorsque l'arc se raccourcit ; ces changements dans la résistance se traduisent aussi par des différences dans l'intensité lumineuse. La bougie Wilde partage cet inconvénient avec la bougie Jamin ; dans la bougie Jablochkoff, le colombin maintient le parallélisme des charbons et compense *en partie* ces défauts, compensation achetée, il est vrai, au prix de changements notables dans la coloration de la lumière, par suite de la présence du colombin.

Dans une bougie électrique, quelle qu'elle soit, il faut donc payer la *simplicité* en faisant des sacrifices sur les *qualités* de la lumière, fixité ou coloration.

Pour maintenir l'arc à l'extrémité des charbons, M. Jamin emploie toujours son cadre directeur. Ce cadre directeur HH formé de quarante spires introduit dans le circuit une résistance qui est loin d'être négligeable ; il produit un effet assez disgracieux, ce qui atténue dans une très grande proportion l'avantage qui résulte du fonctionnement tête en bas.

Bougie électrique de M. Solignac. — M. *Solignac* a combiné des bougies à quatre charbons ; les deux extrêmes ont

quatre millimètres de diamètre et les deux charbons intermédiaires deux millimètres et demi ; les quatre charbons, placés dans le même plan, sont séparés par trois intervalles de un demi-millimètre, sans matière isolante intermédiaire. Le courant arrive à la bougie par les deux charbons extérieurs qui servent d'électrodes. Ces bougies trop délicates et trop coûteuses ne sont pas passées dans la pratique.

Bougie Debrun. — La bougie de M. *Debrun*, à rallumage automatique, se compose de deux crayons de charbon Carré de 6 millimètres de diamètre et de 20 à 30 centimètres de longueur, disposés parallèlement à une distance de 2 à 3 millimètres et dont le parallélisme est assuré par une petite plaque de verre placée à la base entre les deux charbons. L'ensemble est assujetti par du papier verni isolant et deux ligatures en fil de fer. Voilà la bougie constituée très simplement, comme on le voit, et le parallélisme des charbons très suffisamment maintenu.

La bougie se plante dans un chandelier spécial qui, pour les éclairages de durée, peut en recevoir deux, qui s'allument successivement et automatiquement. Voici maintenant comment se produisent l'allumage et le rallumage automatiques.

A la base de la bougie est fixé un petit électro-aimant dont l'armature porte un petit morceau de charbon qui, lorsque le courant le traverse, attire l'armature et vient appliquer le petit morceau de charbon près de la base de la bougie. Grâce au contact ainsi établi, l'arc se forme à la base de la bougie. Dès que le courant traverse la bougie, un petit électro-aimant placé dans le même circuit que la bougie elle-même et placé à part, comme un relais, agit sur une armature reliée à un commutateur à mercure, et coupe le circuit de l'électro-aimant d'amorçage qui était placé en dérivation.

Le courant traverse donc la bougie seulement et le courant d'air chaud qui s'établit à la base l'amène promptement à l'extrémité supérieure. Tant que la bougie brûle, l'électro-aimant du relais maintient le circuit d'allumage ouvert et le petit morceau de charbon éloigné de la bougie. Si elle vient à s'étein-

dre, le commutateur du relais retombe, ferme le circuit de l'électro d'allumage et la même série de phénomènes se reproduit.

Lorsque la première bougie est usée, l'arc vient brûler un petit fil de laiton placé à la partie inférieure ; un gros fil de laiton tordu en forme de ressort se trouve lâché et quitte le contact qui amenait le courant sur la bougie n° 1 pour l'amener aussitôt sur la bougie n° 2 dont l'allumage se produit dans les mêmes conditions.

Toutes les bougies électriques présentent deux inconvénients très graves qui les rendent inférieures aux régulateurs. Le premier est le bruit produit par les courants alternatifs qu'on est obligé d'employer pour user également les deux charbons; le second résulte de la position même des charbons et de leur écart fixe. L'arc jaillit entre les pointes, une partie de la lumière se trouve ainsi noyée ; l'absence de tout réglage dans la distance des charbons empêche de proportionner à chaque instant leur écart à l'intensité du courant qui les traverse, ce qui explique le peu de fixité de la lumière de toutes les bougies.

Pour ne pas les user trop vite, on les alimente par des courants de faible intensité, 8 à 9 *ampères* pour les bougies de 4 millimètres; aussi brûlent-elles en quelque sorte à la limite, en *équilibre instable*. A mesure que les régulateurs se perfectionnent et se simplifient, les bougies électriques perdent de leur importance pratique, sous réserve, bien entendu, de la bougie Jablochkoff dont on n'égalera jamais l'extrême simplicité.

Lampe-soleil. — La lampe-soleil imaginée par MM. *Clerc* et *Bineau* est un appareil intermédiaire entre la bougie Jablochkoff et les lampes à incandescence que nous examinerons dans le chapitre suivant. Aussi, bien que sa forme ne rappelle que très vaguement une bougie, est-il logique de l'examiner ici, pour ne pas ouvrir un chapitre spécial à une classe dont on ne compte encore qu'un seul représentant.

Les figures 69 et 70 font comprendre ses dispositions.

Deux charbons C, C légèrement inclinés sur la verticale sont logés entre une pièce centrale B de marbre blanc ou de magnésie

agglomérée et des pièces extérieures de pierre quelconque ; ils descendent par leur propre poids à mesure de l'usure de leur partie inférieure, et ils sont retenus par une petite saillie ou épaulement qu'on voit sur la pierre extérieure. Tout cet ensemble est maintenu par une boîte de fonte AA, très largement ouverte à la partie inférieure. Cette boîte est suspendue par un grand étrier auquel aboutissent les fils conducteurs.

Le courant est amené à la partie supérieure de l'un et de l'autre par des fils. Avant l'allumage, les deux charbons appuient sur une petite baguette fine de charbon D, qui, par le passage du courant, s'échauffe, se consume rapidement et prépare la production de l'arc voltaïque, comme le fait l'amorce des bougies Jablochkoff.



Fig. 69. — Diagramme explicatif de la lampe-soleil.

Une fois l'arc établi, il se maintient malgré la grande distance entre les bouts des charbons, parce que la surface du marbre ou de la magnésie, qui est entre les deux, a eu le temps de devenir conductrice par échauffement, pendant la période préparatoire de l'allumage.

Cet arc de grande longueur, léchant le marbre, produit une lumière intense, de couleur jaune, ce qui lui a fait donner son nom.

La lampe-soleil dirige toute sa lumière vers le bas, c'est-à-dire du côté qu'on veut généralement éclairer ; mais la suppression totale de lumière dirigée vers le haut laisse les plafonds dans une obscurité qui, parfois, est d'un effet peu agréable. D'autre part, les diverses pièces qui entourent le marbre dans sa partie lumineuse portent ombre et ne donnent au faisceau éclairant qu'un développement assez limité, moins limité cependant que ne l'indique la figure 70.

La lumière mesurée dans la verticale, c'est-à-dire dans la direction d'intensité maxima, a été, dans un cas particulier, de 120 becs Carcel par lampe correspondant à 1 1/4 cheval-vapeur, c'est-à-dire à peu près 100 becs par cheval.

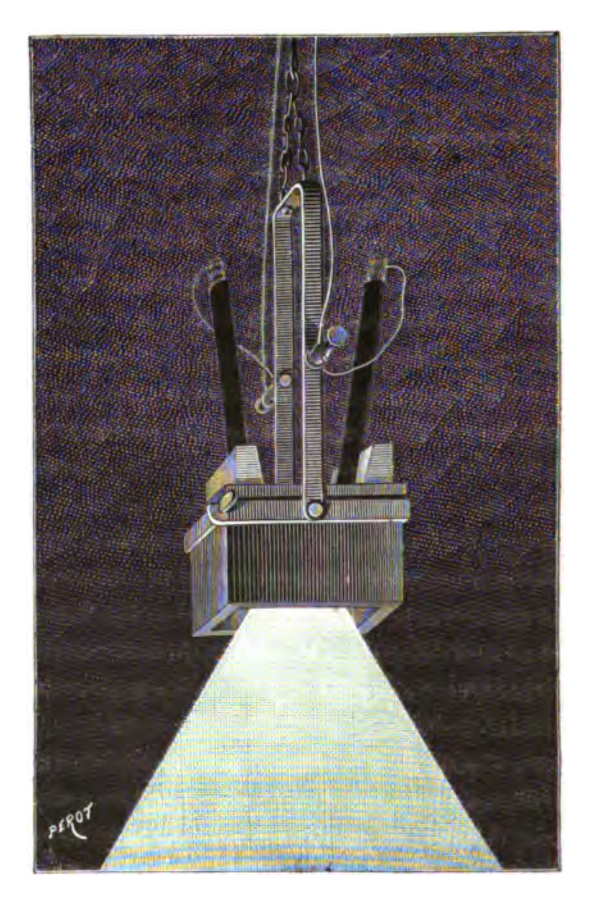


Fig. 70. — Vue d'ensemble de la lampe-soleil.

Dans une autre série d'expériences, on a trouvé que le rendement varie de 50 Carcels par cheval avec une intensité de 5 ampères à 110 et 125 avec 15 à 20 ampères. D'ailleurs l'intensité lumineuse peut varier de 50 à 1000 Carcels, suivant la distance des charbons, la longueur du marbre, et l'intensité du courant.

Un défaut sensible des éclairages à courants alternatifs s'est retrouvé dans ce système ; nous voulons parler du bruit ou ronflement que fait entendre la lampe. On est parvenu à étouffer à peu près ce bruit au moyen de lanternes absolument closes.

Le point lumineux dans la lampe de M. Clerc est absolument fixe, ce qui est bien un avantage ; mais une autre qualité beaucoup plus importante est la fixité absolue de la lumière.

Enfin, le mérite principal de la lampe-soleil est dans sa longue durée, c'est-à-dire dans le temps considérable pendant lequel elle peut fonctionner sans arrêt, sans renouvellement de charbon et sans soin, car l'usure des charbons varie de 8 à 15 millimètres par heure suivant l'intensité du courant, qui peut varier de 3 à 25 ampères. La longueur des charbons elle-même peut être variée de 5 à 30 centimètres, et la lampe peut fonctionner quinze ou seize heures consécutives, si cela est nécessaire.

Le bloc de marbre entre les deux charbons s'use également ; la température très élevée à laquelle sa partie inférieure est exposée entraîne une décomposition du carbonate du chaux, et c'est la chaux qui est incandescente.

Un bloc de marbre peut durer jusqu'à vingt heures de suite ou fournir deux éclairages de dix heures ; la durée totale est moindre s'il sert à des éclairages de deux ou trois heures.

La longueur de l'arc peut varier de 10 à 60 millimètres, suivant la résistance qu'on veut lui donner. Dans un court circuit on emploie une plus grande intensité et un marbre peu épais. Dans un long circuit, on emploiera plus de tension, une moindre intensité et un marbre plus épais. Les lampes les plus employées dans la pratique ont de 10 à 20 millimètres d'épaisseur de marbre ou de magnésie.

Depuis quelque temps, on substitue au marbre de la magnésie agglomérée. Sa durée, beaucoup plus grande, a été jusqu'à cent heures.

CHAPITRE III

L'ÉCLAIRAGE PAR INCANDESCENCE

Dans tous les appareils que nous avons examinés jusqu'ici, la lumière est produite par l'arc voltaïque, ce qui suppose un intervalle matériel plus ou moins long entre les deux conducteurs; cet espace est occupé par des gaz élevés à une très haute température et les particules de carbone détachées des électrodes. Dans les systèmes que nous allons maintenant passer en revue, la lumière est produite par un corps *solide* élevé à une très haute température par le passage d'un courant électrique.

Dans l'éclairage électrique par incandescence, il faut distinguer deux grandes classes fondées sur des principes différents :

1° L'*incandescence avec combustion*, systèmes Reynier, Werdermann, etc. : la lumière est produite par un crayon de charbon traversé par le courant et qui se *consume* plus ou moins lentement.

2° L'*incandescence pure*, dans laquelle le courant électrique traverse une substance relativement peu conductrice et l'échauffe jusqu'à la rendre lumineuse, mais sans détruire sa nature, ou tout au moins en ne la désorganisant qu'à la longue.

Dans ces appareils on emploie tantôt un filament de charbon, tantôt un métal peu fusible tel que le platine, le platine iridié et l'iridium.

LAMPES ÉLECTRIQUES A INCANDESCENCE AVEC COMBUSTION

Lampe Reynier. — La première lampe à incandescence pure remonte à 1841 et est due à *de Moleyns*, mais c'est M. Émile Reynier qui a, en 1877, construit la première lampe électrique à combustion fondée sur l'incandescence d'un crayon de charbon traversé par un courant électrique. M. Reynier fut amené à

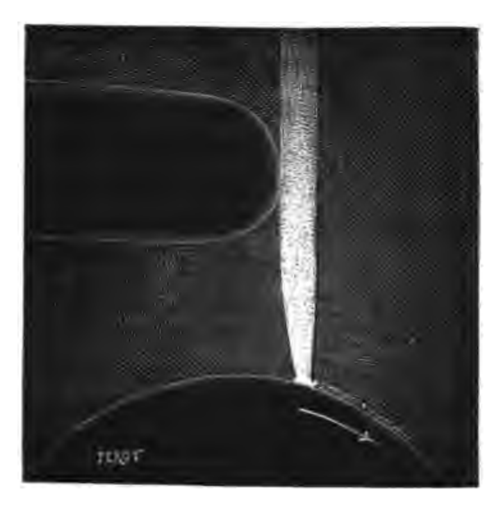


Fig. 71. — Image agrandie du crayon d'une lampe électrique à incandescence. (Système Reynier.)

combiner sa lampe en faisant des expériences avec les lampes russes dont nous parlerons plus loin, à propos de l'incandescence pure. Ces lampes présentaient toutes un défaut capital : l'amincissement du charbon en son milieu, amincissement produisant la rupture et obligeant à substituer un charbon neuf au charbon cassé.

M. Reynier fut conduit à penser que si le crayon touchait par son extrémité un charbon massif, l'usure se produirait au point de contact imparfait, là où la température est la plus élevée à cause de la résistance électrique due à ce contact imparfait.

En faisant l'usure du charbon par son extrémité, on pouvait laisser brûler le charbon à la condition de le pousser, comme on pousse les bougies dans les lanternes de voiture ; la combustion du charbon augmentait même la lumière, en contribuant, par la chaleur qu'il produit, au maintien d'une température élevée.

L'appareil de M. Reynier est donc caractérisé dans son principe par un crayon de charbon poussé contre un contact fixe (fig. 71), et rendu incandescent, entre ce butoir et un point de contact placé à quelque distance du premier. La première lampe marchait avec le courant de quatre éléments Bunsen, modèle Ruhmkorff, une machine de Gramme modèle de laboratoire, et même avec une batterie de trois éléments Planté.

Dans ses premières expériences, M. Reynier trouva que le charbon fixe immobile servant de butoir au crayon incandescent présentait des inconvénients ; il imagina de donner un mouvement lent à ce butoir en le composant d'un disque de charbon tournant autour d'un axe horizontal. Cette lampe fut ensuite simplifiée par l'inventeur de la façon suivante :

Le crayon de charbon est poussé vers le bas par son poids et celui du porte-charbon guidé par des galets. Ce crayon vient appuyer sur un disque de charbon un peu en avant de la verticale du centre du disque ; il en résulte que la descente du crayon, provenant de son usure, fait tourner le disque sans aucun mécanisme. Le crayon est maintenu à une petite distance par un manchon, et en dessous vient s'appuyer un autre contact de charbon qui détermine la longueur incandescente. Par une disposition, très simple, la pression exercée par le crayon sur le disque produit une action automatique de frein sur le porte-charbon moteur ; d'où il résulte que son poids est retenu efficacement tant que le crayon a toute sa longueur et appuie sur le disque, et que ce poids est au contraire dégagé quand le soutien inférieur vient à manquer par suite de l'usure de la pointe. Il est intéressant d'observer que la température la plus élevée est au point de contact inférieur ; il en résulte que le charbon aminci par la combustion lente dans l'air est plus aminci vers le bas et

que la taille et la progression du crayon sont encore facilitées par cette circonstance accessoire qui, d'obstacle qu'elle était pour les lampes anciennes, est devenue une aide pour le système de M. Reynier. A cause de ce fait, on nomme aussi quelquefois les lampes à incandescence avec combustion, *lampes à contact imparfait*.

Les lampes Reynier présentent une certaine élasticité au point de vue de l'intensité lumineuse, car suivant la puissance du courant qui les traverse et la grosseur des charbons, elles peuvent fournir une lumière variant de quatre à quarante becs Carcel.

Lampe Reynier, modèle 1879. — Dans cette dernière disposition de la lampe à incandescence de M. Reynier, le charbon C (fig. 72), poussé dans le sens de la flèche par un mécanisme quelconque, bute sur le contact en bout B, le contact latéral L, monté à l'extrémité d'un levier, s'appuie sur le charbon par le tirage d'un ressort *r* et limite entre *i* et *j* l'incandescence de la baguette.

Le contact en bout B est monté dans un porte-contact fixé à baïonnette dans la douille inférieure du bec. Pour introduire le charbon dans la lampe, on retire ce porte-contact, qui laisse libre l'orifice du tube ; on pousse le charbon dans ce tube, puis on remet en place le contact en bout, et l'appareil est prêt à fonctionner.

L'incandescence, avons-nous dit, se manifeste en *i* et *j* sur une longueur qu'on peut faire varier entre 4 et 8 millimètres. La lumière obtenue est de cinq à vingt becs Carcel par foyer, selon l'intensité du courant électrique et la longueur d'incandescence qu'on s'est donnée. Avec une pile de huit éléments Bunsen plats (modèle Ruhmkorff), on produit une lumière équivalente à douze becs Carcel environ. Quand on fonctionne avec des machines magnéto-électriques, on peut produire, par cheval-vapeur, de trois à cinq foyers valant chacun huit à quatorze becs, ce qui fait un rendement de trente à quarante becs Carcel par force de cheval.

Étant donné le bec, il était aisé de l'adapter à des lampes de

formes diverses. M. Reynier a fait des appareils marchant de haut en bas par l'action d'un contre-poids ou d'une poussée hydrostatique, un modèle à barillet fonctionnant dans toutes les positions et un appareil suspendu, le plus simple de tous : c'est celui que nous représentons figure 72.

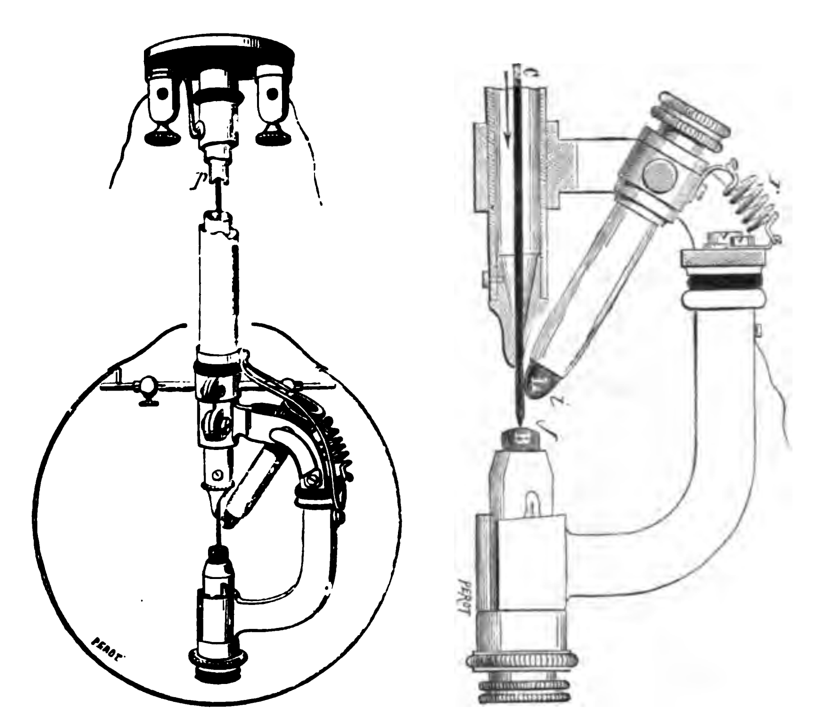


Fig. 72. — Lampe Reynier (modèle 1879).

Ici la progression du charbon est obtenue par la descente du cylindre *p*, qui pèse directement sur la tête du charbon.

Allumeur automatique de M. Reynier. — Lorsqu'on met de huit à douze lampes, *en tension*, sur une machine Gramme ordinaire, comme dans les applications de la lampe à incandescence Reynier, la suppression accidentelle d'un seul foyer cause l'extinction de tous les autres. On est alors plongé dans l'obscurité, sans savoir, le plus souvent, quel foyer est en défaut. Il est inutile d'insister sur la gravité d'un pareil accident

dont la fréquence sera proportionnelle au nombre des foyers.

Voici la solution imaginée par M. Reynier pour parer aux inconvénients d'une extinction partielle. Elle repose sur l'emploi d'un relais automatique appelé *allumeur*, dont on comprendra aisément le principe en s'aidant de la figure 73.

Le conducteur principal C, C, au lieu de se rattacher directement aux deux bornes de la lampe, vient se fixer sur l'allumeur, où il se dérive en deux circuits d'égale résistance, savoir : la lampe M et une spirale de maillechort R. La dérivation qui passe

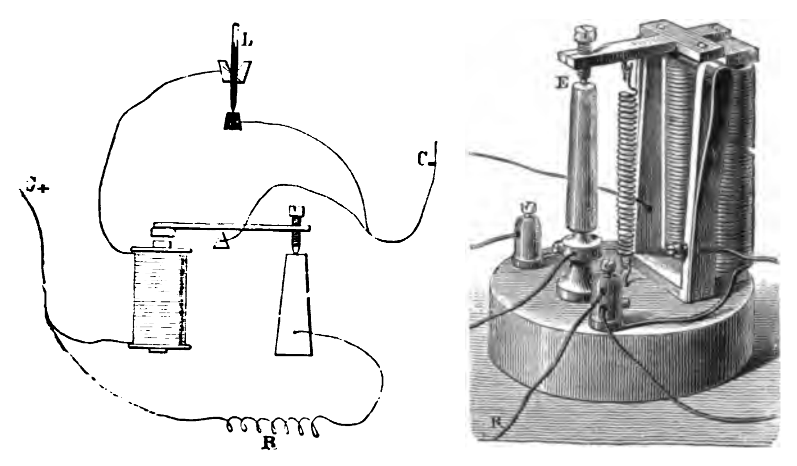


Fig. 73. — Diagramme de l'allumeur automatique de M. Reynier.

Fig. 74.— Forme pratique de l'allumeur automatique de M. Reynier.

par la lampe magnétise un électro-aimant dont la fonction est de rompre, au moyen d'un levier, la dérivation de maillechort, laquelle est refermée automatiquement par le même levier quand l'électro est démagnétisé.

La figure 74 représente l'allumeur sous sa forme pratique. Il est disposé sur un socle, et se trouve ainsi complètement séparé de la lampe elle-même.

Voici comment fonctionne le système, dans tous les cas qui peuvent se présenter.

1° *Les lampes étant toutes garnies de charbon, on ferme le circuit :* le courant se partage pendant un instant entre les résistan-

ces de maillechort et les lampes ; mais aussitôt les électros sont magnétisés et ouvrent toutes les dérivations des résistances, et les lampes seules restent dans le circuit.

2° *Au moment où l'on allume, une ou plusieurs lampes manquent de charbon :* les allumeurs des lampes garnies fonctionnent, ceux des lampes non garnies restent fermés sur les résistances, lesquelles remplacent les lampes éteintes sans modifier l'intensité du courant, ni le pouvoir éclairant des lampes allumées.

3° *Une lampe qui fonctionnait s'arrête parce qu'elle manque de charbon ou par suite d'un accident quelconque :* l'allumeur qui la commande ferme le circuit de la résistance, et les autres foyers ne sont pas impressionnés.

4° *Pendant la marche des autres foyers on regarnit une lampe qui manquait de charbon :* le courant se partage, pendant un instant, entre la lampe regarnie et la résistance de son allumeur, dont l'électro, aussitôt magnétisé, ouvre la dérivation de la résistance, laissant la lampe seule dans le circuit.

L'allumeur, on le voit, répond à tous les cas. Il rend les lampes pratiquement indépendantes les unes des autres, et fonctionne sans aucune intervention du lampiste.

Dans une disposition récente, M. Reynier a mis à profit les propriétés des accumulateurs. Il établit en dérivation sur chaque lampe un nombre déterminé d'accumulateurs, trois par exemple. En marche normale, en vertu de la force contre électro-motrice des accumulateurs, il ne passe pas de courant dans leur circuit. Si la lampe s'éteint, le courant traverse la dérivation tout naturellement, sans aucun mécanisme, les accumulateurs fonctionnent comme une résistance équivalente et ne troublent pas le régime général de la circulation électrique.

Lampe de M. Werdermann. — La lampe de M. Werdermann reproduit certaines dispositions de la lampe Reynier, mais le point le plus caractéristique consiste dans le renversement de l'appareil.

Dans le premier modèle de M. Richard Werdermann, breveté

quelques mois après le système Reynier, le charbon négatif, placé à la partie supérieure, est constitué par un disque de charbon de grande section, le charbon positif étant un crayon de quelques millimètres de diamètre (quatre millimètres et demi dans le dernier modèle).



Fig. 75. — Lampe Werdermann. Élévation et coupe.

Un simple ressort assure la permanence du contact du crayon avec l'électrode positive : le charbon est poussé par un poids au fur et à mesure de son usure.

La lampe Werdermann produit-elle ou ne produit-elle pas un arc voltaïque ? Telle est la question que l'on pose souvent et qui se réduit à une question de définition. Si l'on entend par *arc*

voltaïque un intervalle *matériel* entre les deux électrodes, intervalle rempli par des molécules gazeuses et des particules de charbon portées à une très haute température, on peut affirmer que la lampe Werdermann ne produit pas d'arc voltaïque. A cause de la poussée même du charbon, il est impossible qu'il n'y ait pas contact entre le disque et le crayon de charbon, contact que l'on peut rendre d'ailleurs très léger à l'aide du frein employé dans le dernier modèle.

Mais dans les lampes à incandescence avec combustion, la haute température développée par le courant électrique échauffe fortement l'atmosphère qui entoure le point incandescent, en même temps que des particules de charbon détachées de l'électrode positive viennent s'y consumer. Il se produit donc dans cette partie de la lampe une auréole d'air très chaud, très conducteur, rempli de particules de charbon, en un mot se trouvant exactement dans les mêmes conditions que l'*arc voltaïque* proprement dit.

La réponse du Normand convient donc bien en cette matière. pour couper court à des discussions aussi longues qu'inutiles.

Dans ses nouvelles lampes (fig. 75) l'inventeur s'est attaché à régler la pression du contact latéral sur la tige de charbon d'après la pression que cette tige exerce sur le disque supérieur.

Pour cela, le disque est placé sur un fléau équilibré par un contre-poids glissant sur une tige horizontale placée sur la gauche du point de suspension, et fixé en place par une vis. Ce fléau porte un petit bras, placé à l'intérieur du globe, qui vient exercer sur le contact latéral une pression d'autant plus grande que la pression de ce charbon vertical est elle-même plus grande ; cette pression s'oppose au mouvement ascensionnel de la tige de charbon en la coinçant entre deux mâchoires, l'une fixe et l'autre mobile.

Ce système forme donc un frein dont l'équilibre dépend du réglage primitif du contre-poids. A mesure que le charbon s'use, la pression sur le disque diminue, le contact latéral se desserre un peu et permet le mouvement ascendant de la tige de charbon.

Cette disposition permet d'obtenir de très légers contacts entre le disque et le crayon de charbon ; la pression n'est jamais assez forte pour produire une rupture de la pointe, l'usure du charbon se produit très régulièrement et la lumière possède une grande fixité.

Ces lampes fonctionnant en tension sur le même circuit, il faut que si l'une d'elles s'éteint, pour une cause quelconque, elle soit aussitôt mise hors du circuit et établisse une communication directe entre les deux bornes d'entrée et de sortie du courant, pour ne pas provoquer l'extinction de toutes les autres lampes placées dans le même circuit qu'elle.

Ce résultat est obtenu par le levier même qui sert à presser sur le contact latéral. Lorsque le crayon de charbon n'appuie plus sur le disque, ce disque bascule et le levier vient buter contre un arrêt métallique qui établit une communication directe et met la lampe hors du circuit.

Lampe Werdermann-Napoli. — Dans le dispositif que nous venons de décrire, les deux mâchoires de l'étau qui constitue le frein s'usent avec le temps à cause du frottement perpétuel du charbon et surtout de la température à laquelle elles se trouvent soumises. Ses bords extérieurs finissent alors par se rejoindre, le charbon ne se trouve plus en contact direct avec les mâchoires, le frein n'agit plus et il peut s'établir un arc voltaïque entre un point du charbon et l'une des mâchoires, ce qui mettrait bientôt l'appareil hors de service.

Cet inconvénient a été écarté par plusieurs dispositions ingénieuses dues à M. Napoli. Dans l'une d'elles, les mâchoires sont remplacées par deux galets métalliques dont la tranche est moins épaisse que le diamètre du charbon.

Quelle que soit leur usure, ils ne pourront donc jamais se trouver en contact. Le serrage opéré par les galets est encore réglé par la butée du charbon. Dans une autre disposition, où le charbon est descendant, — comme dans la lampe Reynier, — le serrage des mâchoires, formées par deux minces secteurs, est indépendant de la pression du crayon contre la butée. Le poids

qui provoque la descente des charbons n'agit que par l'intermédiaire d'un ressort. Il est aussi garni d'une série de rainures circulaires qui l'empêchent de descendre trop rapidement et forment piston d'air, comme dans la machine pneumatique de M. Deleuil. Le butoir du crayon de charbon est en cuivre rouge.

Lampes diverses. — M. *Trouvé* a construit un modèle de lampe dans lequel on retrouve le charbon ascendant, le butoir tournant en charbon et la baguette s'usant en bout du système Reynier. En employant des crayons de charbon très fins, on peut produire une lumière de quelques becs Carcel avec dix éléments Bunsen.

Dans la lampe de M. *Ducretet*, la poussée du charbon s'effectue par une colonne de mercure dans lequel il plonge.

Ce dispositif, assez simple en apparence, présente l'inconvénient de dégager des vapeurs de mercure, malgré toutes les précautions prises pour empêcher la chaleur du charbon incandescent d'arriver jusqu'à sa surface.

Enfin M. *Tommasi*, en 1879, a combiné, sous le nom de lampe revolver, une lampe Reynier dans laquelle un certain nombre de charbons, de faible longueur, sont disposés en cercle autour d'un tube de fer de 3 centimètres de diamètre et tournant sur un pivot. Un mouvement d'horlogerie met successivement chacun des charbons dans le circuit, ce qui donne à la lampe une certaine durée. Nous devons signaler aussi la lampe de M. *Joel* qui présente de grandes analogies avec la lampe Werdermann, sans perfectionnements bien importants.

Les lampes Reynier, Werdermann-Napoli et Joel sont les seules lampes à incandescence avec combustion qui ont fonctionné à l'Exposition d'électricité.

LAMPES A INCANDESCENCE PURE.

Les lampes à incandescence pure sont fondées sur le principe de l'élévation de température d'un corps médiocrement con-

ducteur et peu fusible, traversé par un courant électrique.

La lumière émise par un corps chauffé augmentant dans de très grandes proportions avec la température, le problème consiste à trouver un corps peu fusible pour pouvoir porter très haut sa température : il faut aussi concentrer la chaleur sur un très petit espace pour éviter le refroidissement si préjudiciable à la quantité de lumière produite.

Les corps employés pour reproduire la lumière par incandescence sont : le platine, le platine iridié, l'iridium et le charbon.

La première lampe à incandescence de platine date de 1841 et est due à un Anglais, *Frederick de Moleyns*, de Cheltenham.

L'idée d'employer l'iridium et ses alliages est due à *Pétrie* en 1849. Dans son brevet, Pétrie donne la méthode de préparation de l'iridium destiné à ses lampes électriques.

L'idée d'employer du charbon pour produire l'incandescence appartient à *King* qui la fit breveter en 1845. D'après M. Giffard, King était simplement l'agent du véritable inventeur *J. W. Starr* de Cincinnati.

King signalait dans son brevet les avantages du charbon de cornue, mais pour empêcher sa combustion, il le plaçait dans un vase clos où l'on faisait le vide ; deux ou plusieurs appareils semblables pouvaient être mis dans le même circuit d'un courant fourni, soit par des piles, soit par des machines magnéto-électriques.

En 1846, *Greener et Staite* firent aussi breveter une lampe analogue à celle de King ; pour débarrasser le charbon de ses impuretés, on le traitait par l'eau régale.

L'idée de l'éclairage par incandescence tomba ensuite dans l'oubli jusqu'en 1873. Un physicien russe, M. *Lodyguine*, reprit l'étude de la question, ce qui lui valut un prix de l'Académie des sciences de Saint-Pétersbourg en 1874.

Les avantages présentés par le charbon furent alors précisés fort nettement par Wild, chargé du rapport qui fit décerner le prix. « Le charbon possède, à température égale, un pouvoir « rayonnant plus grand que le platine ; la capacité calorifique

« du charbon est beaucoup moindre, de telle sorte que la même « quantité de chaleur élève le crayon de charbon à une tempé- « rature plus élevée qu'il ne ferait d'un fil de platine. En outre, « la résistance électrique de charbon est environ 250 fois celle du « platine, de sorte que le crayon de charbon peut être beaucoup « plus gros, tout en élevant sa température autant que le métal, « Enfin le charbon est infusible et sa température peut être éle- « vée sans danger de fusion. »

M. *Kosloff*, de Saint-Pétersbourg, vint en France pour exploiter le brevet Lodyguine, perfectionna un peu la lampe, mais sans aboutir à de bons résultats.

En 1875, M. *Konn* imagina une lampe analogue ; en 1876, M. *Bouliguine* en construisit une autre avec un seul charbon.

En 1879, apparaît la lampe américaine de M. *Sawyer* dans laquelle le charbon incandescent est plongé dans une atmosphère d'azote ayant pour but de s'opposer à sa combustion.

Dans toutes ces lampes, bien que le charbon ne brûle pas, dans le vrai sens du mot, il se produit néanmoins une sorte de désagrégation, d'évaporation qui continue à ruiner lentement les baguettes incandescentes. Cette évaporation est d'ailleurs nettement prouvée par un dépôt pulvérulent de charbon sublimé, sous forme de nuage noirâtre, qu'on trouve sur la surface intérieure des globes qui renferment les baguettes incandescentes.

Lampes à incandescence de fil de platine. — Nous avons vu page 175 que la première lampe de cette espèce avait été imaginée par de Moleyns, en 1841, et reprise par Petrie en 1849.

En 1857, M. *de Changy* avait imaginé un système permettant la divisibilité du courant électrique. D'après une lettre adressée par M. *Jobard*, directeur du *Musée industriel belge*, à l'Académie des sciences de Paris, M. de Changy avait pu produire, avec une pile de douze éléments Bunsen, douze lumières très fixes et indépendantes les unes des autres, mais les termes du brevet sont si vagues qu'il est impossible de comprendre exactement comment l'appareil de M. de Changy fonctionnait.

En 1878, *Edison* émit les mêmes prétentions que M. de Changy en 1857. La lampe d'Edison, qui fit un certain bruit et qui apporta de grandes perturbations sur la valeur des actions du gaz en Europe et en Amérique, se composait d'une spirale en platine (1), traversée par un courant électrique. Pour empêcher la fusion du fil, une tige métallique placée à l'intérieur de la spirale et chauffée par elle venait, par sa dilatation, établir une communication directe,

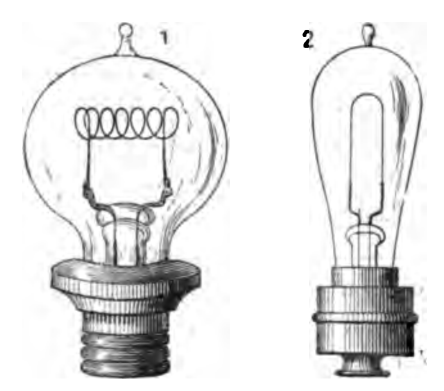


Fig. 76. — Lampes à incandescence d'Edison. — 1. Filament en spirale. — 2. Filament en U.

un court circuit entre les deux bornes de l'appareil et affaiblir momentanément le courant traversant la spirale lumineuse.

Dans la lampe de M. *Lontin*, le réglage s'opérait par la variation de l'intensité du courant, c'est-à-dire par la cause et non par l'effet.

La lampe *Maxim* à incandescence de fil de platine était analogue à celle d'Edison, le réglage s'effectuait aussi par les dilatations de la lame.

(1) La plupart des lampes à incandescence de métaux emploient des fils roulés en spirale. Le but de cette disposition est de concentrer la chaleur du courant en un petit espace pour élever la température du corps à son maximum et, par suite, lui faire émettre une grande quantité de lumière. Un fil de platine traversé par un courant d'une intensité donnée arrive à peine au *rouge* lorsqu'il est développé, tandis qu'il atteint le *blanc* lorsqu'il est roulé en spirale.

Aujourd'hui le platine incandescent n'est plus employé que dans les *polyscopes* de M. Trouvé.

On y a renoncé pour l'éclairage divisé, pour deux raisons : Si l'on porte le fil de platine à une haute température, pour que le rendement lumineux soit satisfaisant, on s'expose à le voir fondre si, pour une cause accidentelle, l'intensité du courant dépasse celle à laquelle le platine peut résister. Si on se tient bien en deçà de cette limite, la lumière est trop rouge, et le rendement est beaucoup trop faible : on réalise alors un véritable gaspillage d'énergie électrique, et par suite de force motrice. Aussi tous les inventeurs y ont-ils successivement renoncé pour reprendre et rendre pratiques les lampes à incandescence de charbon sans combustion déjà essayées depuis longtemps sans grand succès par King, Starr, Greener et Staite, Lodyguine, Kosloff, Konn et Bouliguine.

Lampes à incandescence de charbon. — Après l'insuccès éclatant obtenu par les lampes à fils de platine, Edison reprit, en même temps que d'autres inventeurs, l'idée de lui substituer le charbon. Après un grand nombre d'expériences le succès a couronné les tentatives faites de ce côté et l'Exposition d'électricité renfermait quatre lampes à incandescence qui nous paraissent présenter un grand avenir au point de vue des applications domestiques de l'éclairage électrique et qui réalisent dans des conditions suffisamment économiques la *division de la lumière*. Sans examiner ces lampes dans leur ordre historique, assez difficile à établir dans l'état actuel de la question, nous les passerons en revue en suivant l'ordre alphabétique. Les modes d'alimentation et de réglage seront étudiés dans un chapitre spécial consacré à *la division de la lumière*.

Les quatre lampes, *Edison*, *Lane-Fox*, *Maxim* et *Swan* ont un caractère commun qui nous a permis de les ranger dans la même classe. Elles se composent d'un filament de matière organique carbonisée, de grande résistance électrique, et rendu incandescent par un courant d'une intensité relativement faible, ce qui permet de grouper les lampes le plus souvent *en dérivation*, ce qui assure leur indépendance.

Lampe Edison. — La lampe Edison, qui a subi plusieurs transformations, se compose aujourd'hui d'un filament très ténu formé par des fibres tirées de l'écorce de bambou. Ce filament a tantôt la forme d'un U allongé, tantôt celle d'une spirale. Il y a, à notre avis, avantage à employer cette forme, si la fabrication n'en est pas plus délicate, pour les mêmes raisons qu'on a de rouler en spirale les fils des lampes à platine.

Les lampes correspondent à deux types : celui de 16 candles (1,6 Carcel environ) et celui de 8 candles. La résistance du premier type est de 140 ohms environ à froid, sa longueur de 12 centimètres et sa section de moins de un millimètre carré. Les extrémités sont renforcées et maintenues dans des emboîtements par des écrous ou plus simplement par galvanisation. Ces emboîtements sont reliés à des fils de platine scellés dans le globe où l'on a fait le vide à l'aide de pompes à mercure, tout en faisant passer le courant pour éliminer tout l'air des pores du filament carbonisé.

La durée d'une lampe ainsi construite varie avec l'intensité du courant qui la traverse et l'homogénéité du filament. Elle dépasse quelquefois mille heures. On remplace une lampe par une autre en la vissant simplement sur son support.

Les manchons de cuivre qui servent à tenir les lampes dans les supports et à établir les communications sont maintenues sur le globe à l'aide de plâtre. Ces supports affectent eux-mêmes diverses formes qui permettent aux lampes de prendre plusieurs positions suivant les usages auxquels on les destine.

Lampe Lane-Fox. — Dans cette lampe, le filament carbonisé est du chiendent ; il est aussi recourbé en forme d'U, mais son mode de fixage aux fils de platine sortant de l'ampoule est plus compliqué. Le filament est partout de même diamètre ; il pénètre dans deux petits cylindres de plombagine dans lesquels pénètrent les fils de platine soudés dans une ampoule en verre. La liaison des fils de platine et des conducteurs du circuit s'effectue à l'aide de petites coupelles remplies de mercure. Cet ensemble constitue un joint un peu complexe et ne nous paraît pas présenter d'avantages spéciaux.

Lampe Maxim. — Le filament en forme d'M (fig. 77) est fabriqué avec du carton Bristol découpé et carbonisé. On introduit dans le globe où l'on a fait le vide, une certaine quantité de vapeur d'hydrocarbure (*gazoline*), puis on fait le vide de nouveau en faisant passer le courant, et ainsi de suite un certain nombre de fois, jusqu'à ce que tout l'air ait disparu.

L'expérience a montré que, par le passage du courant, la vapeur raréfiée de gazoline que renferme le globe joue un rôle rénovateur en venant déposer son carbone sur les parties les plus incandescentes, c'est-à-dire les plus minces. Les filaments sont reliés aux pinces de platine à l'aide de charbon tendre qui donne un excellent contact. Les conducteurs sont scellés dans un émail spécial dont le coefficient de dilatation est à peu près le même que celui du platine, ce qui évite les craquelures et contribue à l'étanchéité. Les lampes sont disposées sur une monture en ébonite terminée par une embase en métal nickelé pouvant se visser sur les becs de gaz, à la place des becs ordinaires.



Fig. 77. — Lampe Maxim.

Lampe Swan. — Le filament carbonisé est ici constitué par une tresse de coton de dix centimètres de longueur renflée à ses extrémités, formant une boucle à son extrémité supérieure et fixée dans les supports à l'aide de deux porte-charbons en platine avec anneaux de serrage, comme les porte-crayons employés pour le fusain. On fait le vide dans l'ampoule en portant le charbon à l'incandescence, comme dans les autres systèmes.

Les charbons de toutes ces lampes sont assez rigides et présentent assez d'élasticité pour vibrer lorsqu'on choque la lampe.

Nous verrons plus tard les qualités spéciales à la lumière produite par ces différents systèmes et leur rendement lumineux.

Après avoir décrit les machines propres à produire l'énergie électrique et les *foyers* propres à la transformer en lumière, il nous reste à passer en revue les applications qui en ont été faites et les dispositions employées pour distribuer cette lumière. C'est l'objet du chapitre suivant.

Systèmes divers d'éclairage. — Dans certains cas spéciaux, on a employé des systèmes d'éclairage électrique tout particuliers dont nous devons dire rapidement quelques mots.

M. *Gaiffe* a combiné, pour l'éclairage des mines, un système d'éclairage formé d'une bobine de Ruhmkorff et d'un tube de Geissler enveloppé d'un second tube de verre plus épais destiné à le préserver des chocs. Le mineur porte sur son dos la pile et la bobine disposées dans un petit havre-sac ; la lampe qu'on peut tenir à la main ou accrocher est tenue à la main par des fils souples d'une certaine longueur. M. *Planté* a proposé, dans le même but, l'emploi de sa pile secondaire. M. *Jablochkoff* a obtenu en 1878 l'illumination de lames de kaolin avec des courants de haute tension développés dans une bobine d'induction sans trembleur par les courants alternatifs des machines de Gramme. La lumière est très fixe et très belle : elle varie, suivant la puissance de la source, entre deux et quinze becs Carcel. Ce système est donc un véritable éclairage par incandescence, mais il faut préalablement amorcer la lame, l'échauffer pour la rendre conductrice en joignant les deux électrodes qui communiquent à la

lame de kaolin par un crayon de charbon de cornue. En provoquant d'abord l'étincelle en un point, le charbon rougit, transmet sa chaleur à la partie du kaolin la plus voisine et le courant passe, d'abord sur un petit parcours, puis sur une longueur de plus en plus grande, à mesure qu'on fait glisser le charbon sur le kaolin. L'usure de la lame de kaolin est insensible et ne dépasse pas un millimètre par heure.

M. Jablochkoff a obtenu des résultats encore meilleurs par ce système en intercalant dans le circuit d'une machine magnéto-électrique de l'*Alliance* un condensateur et la lame de kaolin.

Il n'emploie plus alors de bobines d'induction ; ce sont les décharges successives du condensateur qui alimentent la lame de kaolin.

Quelques inventeurs ont aussi proposé l'emploi de poudres rendues incandescentes par leur passage à travers un arc voltaïque. Un Anglais, *Way*, illuminait des filets de mercure traversés par le courant ; les vapeurs mercurielles dégagées par cette lampe ont empoisonné son inventeur.

Deux Américains, MM. *Moléra* et *Cébrian*, ont proposé de créer un petit nombre de foyers uniques et de canaliser la lumière produite par ces foyers à l'aide de lentilles et de réflecteurs le long des bâtiments et sous les parquets, pour distribuer la lumière à domicile. C'est là une fantaisie américaine de grande envergure. La canalisation de la lumière a cependant donné de bons résultats, pour l'éclairage des poudrières, réalisé par M. *Tchikoleff*, en Russie.

De toutes ces tentatives plus ou moins heureuses et de bien d'autres dans le détail desquelles il nous est impossible d'entrer, il ne reste plus aujourd'hui que deux méthodes générales d'éclairage électrique :

1° *L'arc voltaïque*, par les régulateurs et les bougies ;

2° *L'incandescence*, avec ou sans combustion.

CHAPITRE IV

LES APPLICATIONS DE L'ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE

Les applications de la lumière électrique prennent de jour en jour une importance plus grande, et il serait trop long d'énumérer toutes celles qu'elle a déjà reçues depuis les premières expériences de *Deleuil* et *Archereau* en 1842.

Nous nous contenterons d'en signaler quelques-unes parmi les plus importantes, depuis les puissants foyers de 4000 becs Carcel et plus, jusqu'aux lumières à incandescence dont la puissance lumineuse atteint un dixième de bougie à peine, et qui servent en médecine à l'éclairage des cavités obscures.

Après avoir décrit les différents modes de produire le courant électrique et les appareils qui transforment en lumière l'électricité qu'on leur envoie, nous devons examiner la valeur de chacune des sources électriques par rapport aux foyers qu'elle doit alimenter, avant de passer en revue les diverses applications qui en ont été faites. Nous suivrons pour cet examen rapide l'ordre que nous avons suivi pour l'étude des générateurs électriques.

Piles à liquides. — Bien que l'on puisse, *théoriquement*, faire de la lumière électrique avec une pile *quelconque*, à la condition de disposer convenablement uu nombre suffisant d'éléments, il n'existe pas de piles à liquides capables de produire facilement et *économiquement* de la lumière. Les grands développements de l'éclairage électrique ne datent que de l'emploi des

machines. Avant les machines, la pile de Bunsen, sous ses différentes formes, a été appliquée pour l'éclairage des grands travaux avec le régulateur Serrin, les projections et les théâtres avec le régulateur Foucault et Duboscq. Aujourd'hui encore elle est employée à l'Opéra, pour les effets de scène ; mais il est probable que l'introduction de machine ne s'y fera pas longtemps attendre. L'emploi des piles pour l'éclairage électrique, sauf quelques rares exceptions, est réservé exclusivement aux cabinets de physique, aux expériences de laboratoire et aux projections.

En dehors des considérations économiques, qui font rejeter l'emploi des piles, à cause de leur prix élevé, la manipulation d'un grand nombre d'éléments, — il en faut au moins quarante de puissance moyenne pour produire un arc voltaïque un peu stable — présente des ennuis et des difficultés, et les vapeurs d'acide hypoazotique sont très dangereuses à respirer.

Malgré ces nombreux inconvénients, M. *Tommasi* a essayé, en 1879, de rendre la pile Bunsen pratique et applicable à l'éclairage domestique. L'élément Tommasi, qui ne présente rien de bien particulièrement nouveau, malgré le nom un peu prétentieux de *pile perpétuelle* dont l'a baptisé M. l'abbé Moigno, ne peut en aucune façon remplir le but que se propose l'inventeur et la société qui l'exploite.

La pile dite *impolarisable* de M. *Cloris Baudet* se trouve, à la réclame près, dans le même cas que la pile Tommasi.

M. Émile Reynier était, plus que personne, intéressé à trouver une pile pratique qui, appliquée à ses lampes, leur aurait ouvert un immense champ d'applications. Après avoir essayé toutes les piles connues capables de donner quelques résultats, il en a conclu qu'aucune d'elles ne pouvait satisfaire aux conditions exigées pour les applications de l'électricité à l'éclairage domestique. Les piles de MM. Tommasi et Cloris Baudet n'ont rien changé à ce jugement : le champ reste donc ouvert aux inventeurs qui seront peut-être plus heureux dans l'avenir.

Piles thermo-électriques. — L'application des piles thermo-électriques à l'éclairage ne date que d'hier, et c'est à M. Cla-

mond que revient l'honneur de l'avoir produit pour la première fois en 1879.

Avec la pile de 6000 éléments que nous avons décrite page 43, M. Clamond a pu faire fonctionner deux régulateurs Serrin disposés spécialement pour cette pile et fournissant une lumière variant de trente à cinquante becs Carcel pour chacun d'eux.

On s'est arrêté à ces résultats encourageants.

Nous ne pouvons ici qu'exprimer le regret de voir M. Clamond abandonner ses recherches sur cette importante question, et nous souhaitons vivement qu'elles soient bientôt reprises.

Piles secondaires. — Bien que la pile secondaire ne soit pas à proprement parler un générateur électrique, elle peut rendre des services dans plusieurs applications spéciales dont nous citerons quelques-unes.

Les piles secondaires permettent de produire, après quelques minutes de charge, avec deux éléments Bunsen, un arc voltaïque d'une durée de quelques secondes et d'une très grande intensité eu employant un nombre suffisant de couples secondaires. Cette lumière pourrait être appliquée aux signaux lumineux, à la photographie, et, en général, dans tous les cas où l'on ne demande pas une longue durée d'éclairage.

En étendant encore le problème, les piles secondaires permettront, si l'on parvient à augmenter la puissance d'emmagasinement des éléments, d'utiliser les forces naturelles, cours d'eau, vents et marées, à l'éclairage électrique.

Il n'y a aucune utopie à prévoir une pareille application, car elle repose sur un principe philosophique qui est l'utilisation des forces perdues, ou plutôt non utilisées, et sur des appareils qui ont tous déjà une existence réelle, moulins à vent, turbines, machines électriques et batteries d'emmagasinement. Nous y reviendrons à propos de la distribution de l'électricité.

Machines magnéto et dynamo-électriques. — L'éclairage électrique s'accommode également bien le plus souvent, des différents générateurs mécaniques d'électricité, à courants continus ou alternatifs, magnéto ou dynamo-électriques. Dans l'appli-

cation cependant, les machines et les foyers sont étudiés pour fonctionner ensemble et on s'attache à leur donner des qualités qui répondent à leur association.

Les lampes *monophotes* marchent également bien avec tous les courants pourvu que l'intensité et la pression du courant soient suffisantes pour alimenter l'arc.

Les régulateurs *à division* emploient aussi indifféremment les deux sortes de courants, mais ils sont étudiés pour fonctionner avec des machines d'un type déterminé, appartenant le plus souvent au même inventeur. Nous citerons comme exemple les machines Gramme, Siemens, Brush, Weston, etc., qui alimentent les lampes correspondantes.

Toutes les *bougies* emploient les courants alternatifs : l'obligation d'user également les deux charbons impose cet emploi d'une façon absolue. Le courant alternatif produit cependant dans le foyer un bruit fort désagréable de nature à en faire rejeter l'emploi dans bon nombre d'applications.

Les lampes à *incandescence* Reynier, Werdermann, Napoli, s'accommodent aussi des deux natures de courants, mais il semble que le courant continu donne un rendement plus élevé.

L'*incandescence sans combustion* se produit, en général, avec les courants continus. Cependant les lampes *Swan* du lustre de l'Opéra étaient alimentées, pendant les expériences, par des machines Siemens à courants alternatifs.

Le nombre de foyers alimentés par une seule machine est aussi très variable. On peut ne mettre qu'un foyer par machine ; c'est une installation coûteuse à laquelle on n'a plus recours aujourd'hui que dans des cas spéciaux. La lampe à division permettait d'établir deux, quatre, six, dix et jusqu'à quarante foyers à arc voltaïque sur un même circuit, *en tension*.

Les bougies électriques se montent par séries, en divisant le générateur en plusieurs circuits distincts.

Les lampes à incandescence s'alimentent aussi par séries, suivant les qualités du courant fourni par les machines. La tendance actuelle dans les distributions de lumière, est de les établir *en*

dérivation. On assure ainsi l'indépendance absolue des foyers.

On voit, par ce que nous venons de dire, qu'il n'existe pas de source électrique dont on puisse conseiller universellement l'emploi. Chaque circonstance spéciale doit déterminer le choix à faire suivant le nombre de foyers, leur puissance, le besoin plus ou moins grand de régularité, de simplicité ou d'économie. Dans les quelques exemples d'application que nous allons maintenant passer en revue, nous signalerons la source employée, en donnant, autant que possible, les raisons qui en ont motivé l'emploi.

Éclairage des phares. — C'est le 26 décembre 1863 que les phares de la Hève reçurent pour la première fois un éclairage électrique avec les machines de l'*Alliance*.

En Angleterre, on employa peu de temps après les machines de Holmes, peu différentes de celles de l'*Alliance*.

Les courants employés aux phares de La Hève sont alternatifs ; au cap Lizard, on emploie des courants continus.

Dans l'état naturel de l'atmosphère les machines de l'*Alliance* à quatre disques donnent une portée de 38 kilomètres, et celles à six disques une portée de 50.

En France, on a donné aujourd'hui la préférence aux machines magnéto-électriques à courants alternatifs de M. Méritens qui, malgré leur poids et leur prix élevés, présentent les avantages d'une grande simplicité et d'une grande régularité.

Éclairage des navires. — La lumière électrique peut rendre aussi de grands services dans l'éclairage des navires où l'on dispose de vapeur pour la force motrice, et où l'installation d'une machine dynamo-électrique ne présente pas de difficultés.

Pour les navires de guerre, on complète l'installation de la lumière électrique par des projecteurs qui ont pour effet de renvoyer la lumière dans une direction donnée et de sonder successivement tout l'horizon. Les machines dynamo-électriques sont mises en mouvement par de petits moteurs à trois cylindres, système Broterhood, Maxim ou Dolgorouki : la marine française emploie le régulateur à main qui, pour les usages de la

guerre, permet d'obtenir plus facilement les extinctions, les rallumages et de régler instantanément l'intensité de la lumière projetée sur un point donné.

Signaux. — La lumière électrique rendra aussi de grands services pour les signaux de nuit, soit en éteignant la ou les lumières, soit en masquant et en démasquant successivement le foyer qui doit être éteint ou rallumé.

La manœuvre se fait à distance par un système très bien combiné par M. *de Mersanne* qui permet, en même temps qu'on effectue ces allumages et ces extinctions, de contrôler si elles ont été effectivement produites sans voir la lampe.

Applications à la guerre. — La lumière peut être appliquée à la guerre, soit pour fournir des signaux, soit pour produire des éclairages de plus ou moins longue durée, comme, par exemple, pour reconnaître une fortification, diriger le tir d'une batterie, pour ne pas être surpris lors de l'ouverture d'une tranchée, pour l'éclairage d'une brèche ou d'un assaut, etc. Ces différentes applications ont été étudiées par M. Martin de Brettes dans un mémoire intéressant publié par M. du Moncel dans son *Exposé des applications de l'électricité*. Nous y renvoyons le lecteur.

Aujourd'hui l'emploi des machines dynamo-électriques actionnées par des locomobiles facilite ces opérations.

Pour les signaux de guerre, M. Gramme a combiné une machine de petites dimensions qu'on peut faire mouvoir à bras d'homme. Quatre hommes attelés à une manivelle produisent 50 becs Carcel, intensité bien suffisante la plupart du temps pour les besoins de la guerre.

Éclairage des trains de chemins de fer. — La lumière électrique n'est pas encore appliquée d'une façon courante dans les trains de chemins de fer pendant la nuit, mais on poursuit en ce moment des expériences fort intéressantes pour l'éclairage des locomotives, d'une part, et celui des voitures, d'autre part, par des lampes à incandescence et des accumulateurs. Ce n'est donc plus qu'une affaire de temps.

Éclairage des usines et des manufactures. — C'est pour

l'éclairage des grands espaces que convient surtout la lumière électrique à arc voltaïque, aussi a-t-elle reçu depuis quelques années dans ce but un très grand nombre d'applications, plus spécialement lorsque l'usine possède un moteur puissant à vapeur ou hydraulique, sur lequel on peut distraire quelques chevaux de force pour l'éclairage des ateliers, cet éclairage cessant lorsque le moteur s'arrête, en même temps que le travail lui-même. Les premières installations ont été faites avec des régulateurs monophotes et des machines Gramme ou Siemens : il fallait alors une machine et une transmission par foyer. Depuis quelques années les machines puissantes et les régulateurs à division tendent à se généraliser ; on préfère alors prendre un type de machine suffisant pour alimenter tous les foyers dont on a besoin le plus souvent en un seul circuit ou en un petit nombre de circuits ; l'économie ainsi réalisée porte à la fois sur le prix de la machine unique remplaçant les machines multiples, l'installation des transmissions, des conducteurs et l'entretien du matériel.

Les foyers ainsi obtenus sont moins puissants que les foyers monophotes, mais on les préfère à dépense égale, quitte à en multiplier le nombre pour obtenir un éclairage mieux réparti et mieux diffusé.

Cette diffusion est d'ailleurs presque indispensable dans la plupart des applications. C'est ainsi qu'à l'administration des télégraphes de Bruxelles, on éclaire la grande salle des appareils à l'aide de deux foyers, disposés de telle sorte, qu'on ne peut voir le foyer lui-même d'aucun point de la salle.

D'autres fois, comme dans la blanchisserie du Breuil-en-Auge, on s'est servi des lampes à incandescence de M. Reynier.

L'incandescence pure rendra aussi des services pour l'éclairage des usines et des ateliers en apportant une lumière douce et discrète dans les endroits où l'arc n'avait pu pénétrer jusqu'ici. On réalisera alors des éclairages *mixtes*, répondant à tous les besoins de la pratique, et il sera possible de ne plus installer de gaz dans les usines, où la force motrice est suffisante, et l'on trouvera ainsi de l'économie jusque dans l'incandescence pure.

La lumière électrique au théâtre. — Les débuts de la lumière électrique au théâtre datent de 1846. C'est dans l'opéra *le Prophète*, qu'elle apparut pour la première fois sous l'apparence d'un effet de soleil qui excita l'étonnement et l'admiration du public.

Il y a près de vingt ans que M. Duboscq a été chargé de projeter, sur la scène de notre Académie nationale de musique, les rayons de l'arc voltaïque, et c'est encore lui qui a organisé l'installation électrique du nouvel Opéra.

La lumière électrique a été produite jusqu'ici sur la magnifique scène que l'on doit à M. Charles Garnier, par trois cent-soixante éléments de pile Bunsen qui sont installés dans une salle du rez-de-chaussée du nouveau monument.

Nous n'insisterons pas davantage sur cette installation qui n'est plus en rapport aujourd'hui avec les progrès modernes et qui finira certainement par disparaître dans un temps peu éloigné.

L'éclairage électrique de l'Hippodrome. — L'éclairage électrique de l'Hippodrome comprend cent vingt bougies Jablochkoff et vingt et un régulateurs Serrin, qui, en plein fonctionnement, dépensent cent-soixante chevaux de force. L'usage de deux systèmes différents, bougies et régulateurs, nécessite l'emploi de deux systèmes de machines différents.

Les cent vingt bougies sont alimentées par trois machines à courants alternatifs de vingt bougies chacune et par une machine de soixante bougies ; cette dernière machine est la plus grande machine à courants alternatifs construite jusqu'ici ; elle ne diffère des autres que par ses dimensions et sa puissance. Les régulateurs sont alimentés chacun par une machine Gramme à courant continu. Chaque machine ne peut alimenter qu'un seul régulateur à la fois, mais à l'aide d'un commutateur à plusieurs directions, on peut éclairer différentes parties de la salle suivant les exigences du spectacle.

Tous les changements s'effectuent avec une rapidité et une facilité remarquables. Signalons encore une disposition qui a permis de réaliser quelques économies dans l'installation. On

n'emploie pas de fil de retour pour compléter le circuit. Le retour se fait par la terre, ou plutôt par la charpente de l'Hippodrome, qui, toute en fer, sert de conducteur et complète le circuit.

Les machines à division sont à courants alternatifs du système Gramme.

Tandis que les trois machines de vingt bougies dépensent soixante chevaux, M. Geoffroy, l'ingénieur en chef du service électrique, estime que la machine de soixante bougies n'absorbe pas plus de cinquante chevaux de force : on retrouve donc encore ici l'avantage que présente l'emploi des machines puissantes sur celui des petites machines. Le travail dépensé varie entre cent soixante et cent soixante-dix chevaux-vapeur. La force motrice est fournie par deux moteurs à vapeur du type dit *Compound*, de cent vingt chevaux chacun. Deux volants-poulies de $2^m,60$ de diamètre transmettent le mouvement à deux arbres intermédiaires à l'aide de courroies en caoutchouc de 40 centimètres de largeur : cet arbre intermédiaire porte un tambour sur lequel passent les courroies en crin qui transmettent le mouvement aux machines électriques. Trois chaudières à vapeur, à foyer intérieur et à bouilleurs supérieurs, de soixante-quinze chevaux chacune, complètent l'installation.

Rien de plus vivant et de plus intéressant que cette usine électrique au moment du spectacle, lorsque tout est en marche et que chacun est à son poste.

Il nous reste à dire quelques mots de la question économique, qui joue ici un très grand rôle. L'éclairage électrique de l'Hippodrome, dont personne ne peut nier la puissance ni la beauté, coûte, tous frais comptés, 250 à 260 francs par soirée. L'éclairage au gaz, il y a quelques années, coûtait de 1,100 à 1,200 francs et produisait un effet assez mesquin.

Voilà donc une application d'une importance considérable réalisant une économie qui ne se retrouverait plus pour une application de la lumière électrique de faible importance ; dans ce cas, le gaz reprendrait incontestablement ses avantages.

Application de la pile secondaire à la galvanocaustie

et à l'éclairage des cavités obscures. — La propriété du courant voltaïque de porter au rouge les conducteurs métalliques résistants, en les traversant, a été utilisée en chirurgie par John Marschall vers 1851 ; par Leroy d'Étiolles, 1853 ; Mideldorpf, 1854 ; Broca, 1856, etc.

Ce ne fut que plus tard qu'on chercha à produire l'éclairage. En 1867, M. le docteur Bruck, dentiste à Breslau, présentait un appareil destiné à éclairer les cavités buccales et auquel il donnait le nom de *stomatoscope*. Un peu plus tard, en France, M. le docteur Millot fit de nombreuses expériences pour éclairer l'estomac des animaux, à l'École pratique de Paris.

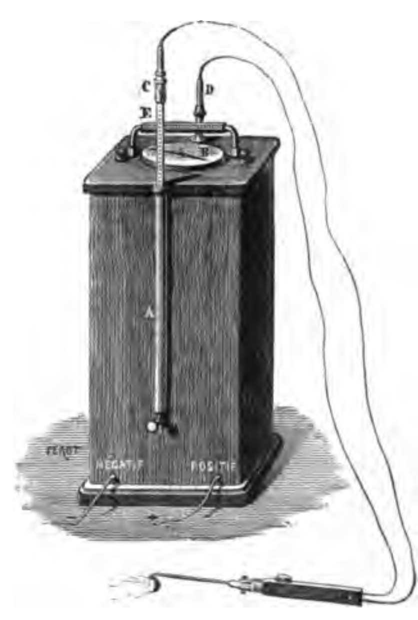


Fig. 78. — Polyscope de M. Trouvé.

Le succès ne répondit pas à ces tentatives par suite de l'inconstance de la source électrique (couples de Grove et de Bunsen) qui nécessitait alors des fils de platine très gros, pour ne pas les exposer à une volatilisation permanente. On obtenait bien des effets lumineux, mais on obtenait en même temps des effets calorifiques trop intenses pour l'application de ce mode d'éclairage. On eut recours à une circulation d'eau pour anéantir ce calorique au fur et à mesure de sa production, mais les appareils étaient trop volumineux et devenaient d'un maniement difficile. Aussi ne passèrent-ils pas dans la pratique.

M. *G. Planté* indiqua dès 1868 l'application de la pile secondaire pour cet usage et le réalisa en 1872.

En 1873, M. le Dr *Onimus* a effectué avec l'appareil de M. Planté des cautérisations de la glande lacrymale sur sept ou huit sujets

successivement sans qu'il ait été nécessaire de recharger l'appareil. M. *Trouvé* a ajouté à l'appareil de M. Planté un rhéostat à fils de platine destiné à graduer l'intensité du courant suivant le diamètre et la longueur du fil de platine employé comme appareil éclairant ou comme cautère. C'est cet appareil auquel il a donné le nom de *polyscope* et que nous représentons dans sa boîte (fig. 78).

Grâce au rhéostat, on peut porter au point de fusion, sans jamais le dépasser, pendant plusieurs heures consécutives, des fils de platine depuis $\frac{1}{15}$ jusqu'à 1 millimètre et demi de diamètre. M. Trouvé emploie, au lieu de spirales de platine, de petits fils

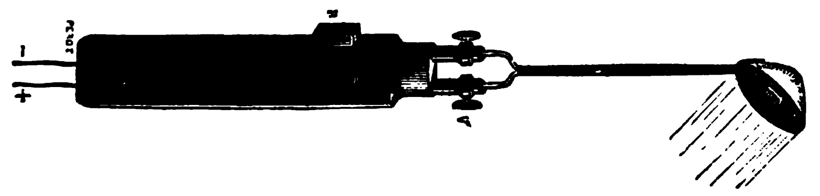


Fig. 79. — Réflecteur avec manche à pédale.

aplatis au milieu, de manière à former un petit disque incandescent.

Pour l'éclairage des cavités, M. Trouvé emploie une série de réflecteurs sphériques, concaves ou paraboliques, munis ou dépourvus de miroirs. Un manche à pédale et des conducteurs relient ces réflecteurs au réservoir en C et D.

La figure 79 représente un réflecteur avec manche à pédale pour l'éclairage de la gorge et des autres cavités obscures.

Au cinquantenaire de la fondation de l'École centrale, en 1879, M. Trouvé a illuminé pour la première fois, avec un polyscope spécial, l'intérieur d'un brochet ; rien de plus intéressant que de voir *par transparence* l'intérieur de ce poisson qui ne paraît pas d'ailleurs autrement incommodé de sa transformation en lanterne vénitienne d'un nouveau genre. On s'explique facilement la puissance de l'éclairage obtenu avec une source lumineuse relativement aussi faible par la loi du carré des distances : en

plaçant le point lumineux très près de l'objet à éclairer, et en ayant l'œil dans l'obscurité, on se trouve dans les meilleures conditions possibles pour bien voir cet objet.

Applications diverses. — Nous avons choisi presque au hasard, parmi les applications si nombreuses et si diverses qu'a reçues la lumière électrique pendant ces dernières années; il faudrait un volume entier pour passer en revue toutes celles où elle a rendu les services qu'on aurait en vain demandés au gaz.

On s'en sert dans les *mines*, soit avec des tubes de Geissler, comme dans l'appareil de MM. *Dumas* et *Benoît*, soit avec des régulateurs Serrin et des machines Gramme, comme aux ardoisières d'Angers, soit avec la lampe à incandescence Edison, Swan, etc. Avant l'invention des machines dynamo-électriques, la lumière électrique avait déjà eté employée avec des piles pour certains travaux de construction, tels, par exemple, que la construction de l'Imprimerie nationale en 1868-69. Les bougies Jablochkoff ont été utilisées pour l'achèvement rapide du palais du Trocadéro, la restauration du palais du Sénat au Luxembourg, du pont des Invalides, etc. On n'en est plus à compter les applications de la lumière électrique à l'éclairage des gares, des ateliers et des places publiques. Nous la trouvons dans des églises et des théâtres, des bibliothèques et des skating-rinks; sous l'eau pour l'éclairage des travaux hydrauliques et le sauvetage des navires naufragés, dans les trains de chemins de fer, à bord des navires, dans l'air, sur les plus hauts édifices, comme au 14 juillet, où elle formait une couronne de feu au sommet du Panthéon.

N'oublions pas non plus les applications fantaisistes que certains inventeurs trop enthousiastes réservent pour la lumière électrique. Plusieurs ont voulu éclairer une ville entière en disposant en un point élevé une lumière d'une puissance incomparable devant jouer le rôle d'un vrai *soleil électrique*. La loi du carré des distances vient malheureusement montrer bien vite combien cette idée est irréalisable, en dehors des difficultés que présente la création d'un foyer électrique d'une intensité suffisante.

D'autres ont proposé d'éclairer les voitures à l'électricité en mettant à profit le mouvement même du véhicule, et on a fait circuler pendant quelques jours à Paris une *voiture-réclame* fondée sur cette idée.

On a aussi proposé l'emploi de la lumière électrique à la *pêche;* des expériences faites sur le lac d'Enghien ont montré que le procédé était excellent... pour faire fuir le poisson effrayé par cette clarté vive et inattendue. Dans cette expérience, ce n'est pas le poisson qui fut le plus attrapé.

Signalons enfin, parmi les applications plus sérieuses, l'emploi aux projections dans l'enseignement, la reproduction et l'agrandissement des photographies microscopiques qui ont rendu de si grands services pendant la guerre de 1870, les reproductions des agrandissements tels que la *linographie*, si bien exécutée par M. *Pierre Petit*, la photographie la nuit passée dans la pratique courante chez M. *Van der Veyde*, à Londres, et M. *Liebert*, à Paris.

Nous allons maintenant examiner les avantages et les inconvénients de la lumière électrique, dire quelques mots de son prix de revient, et après cet examen de l'état actuel du problème de la *division de la lumière*, on saisira bien mieux quel avenir immense lui est réservé si, comme on est en droit de l'espérer, le progrès suit la marche ascendante qu'il a su si bien conserver jusqu'à ce jour.

Avantages et inconvénients de la lumière électrique. — Comme le dit très justement M. Fontaine dans l'avant-propos de son ouvrage sur *l'Éclairage à l'électricité*, « il est incontesta-« ble que, lorsqu'on a besoin d'une lumière très intense en un « seul point, comme cela a lieu dans les forts pour surveiller « l'ennemi, dans les ports pour combattre l'effet destructif des « bateaux-torpilles, dans les phares pour guider les navigateurs, « la lumière électrique est non seulement la plus économique de « toutes les lumières, mais elle est encore souvent la seule qui « soit applicable. Il est également certain que, pour un grand « chantier comme celui de l'avant-port du Havre ou pour une « vaste enceinte comme celle de l'Hippodrome de Paris, où il est

« impossible de suspendre des appareils d'éclairage et de placer « des candélabres sur la piste, la lumière électrique est la seule « possible, la seule qui puisse remplacer le soleil absent.

« On peut donc tout d'abord affirmer que l'éclairage à l'élec- « tricité a un domaine qui lui est propre et où il ne craint même « pas la concurrence des autres systèmes. » Voilà donc la lumière électrique classée comme *foyer intense*, et sans concurrence possible de la part des systèmes antérieurs. Nous l'examinerons tout à l'heure au point de vue des *foyers divisés*.

Un second avantage de la lumière électrique est la faible quantité de la chaleur dégagée par l'arc voltaïque. M. *Laurbé* (1) a calculé qu'à lumière égale, l'arc voltaïque produit de *cent cinquante* à *deux cents* fois moins de chaleur qu'un bec de gaz. Cette propriété est très précieuse et très appréciée dans un grand nombre d'applications où la chaleur dégagée par le gaz est véritablement insupportable. Ajoutons comme corollaire de cet avantage que, n'empruntant à l'air ambiant qu'une très faible partie de son oxygène, — celui qui est nécessaire à la combustion des charbons, — elle ne vicie pas l'atmosphère.

Un autre avantage de la lumière électrique, — avantage contesté néanmoins par un grand nombre de personnes impartiales, — est sa coloration, qui permet de conserver aux couleurs toutes leurs nuances, et de différencier les teintes les plus voisines. Le contraste seul lui donne cet aspect blafard dont on l'accuse, et on n'a qu'à regarder simultanément un bec de gaz et une bougie Jablochkoff par exemple, pour voir combien le reproche est mal fondé ; le seul coupable est le gaz dont la lumière est d'une couleur jaune très prononcée, mais notre œil est si habitué à cette lumière colorée que la lumière électrique qui, comme celle du soleil, renferme toutes les couleurs du spectre, nous paraît pauvre parce qu'elle est au contraire trop riche et pèche par excès de qualités.

D'ailleurs, il est très facile, avec les lampes à incandescence

(1) Voir *la Lumière électrique* du 15 novembre 1879.

pure, de reproduire ces tons jaunes auxquels notre œil ne peut encore se déshabituer.

Ajoutons, comme avantages non moins importants, que la lumière électrique ne répand pas d'odeur, nous met à l'abri des explosions, diminue dans une grande proportion les chances d'incendie, permet d'éclairer des espaces très éloignés du lieu de sa production, et peut, lorsqu'on ne fait pas un éclairage *direct*, mais un éclairage par *réflexion*, répandre autour d'elle une splendide lumière diffuse qui lutte avec avantage, au point de vue de l'économie, avec celle du gaz.

Passons maintenant aux inconvénients. Le premier que nous voulions signaler, parce qu'il n'est qu'à titre transitoire et disparaît à mesure que les appareils se perfectionnent, provient du *manque de fixité* de la lumière, soit comme intensité, soit comme coloration.

Avec les appareils que nous avons décrits dans cet ouvrage, on obtient une constance très grande lorsqu'ils sont bien construits et bien réglés : les régulateurs Serrin et Jaspar et les régulateurs polyphotes présentent toute la fixité nécessaire ; quant aux bougies, les changements de coloration et d'intensité sont dus à ce que, dans ces appareils, comme nous l'avons dit chapitre II, on a sacrifié la *qualité* de la lumière à la *simplicité* et à la *rusticité* du foyer. L'inconvénient provenant des extinctions accidentelles disparaît de jour en jour, à mesure que le personnel devient plus habile dans le maniement des appareils et des lampes.

On peut reprocher aussi à certains foyers électriques un bruit souvent très fatigant qui en proscrit l'emploi dans des locaux silencieux et exigus. Ce bruit particulier peut être très atténué dans les bougies et les régulateurs qui emploient les *courants alternatifs*, mais ne peut disparaître complètement; il provient de la nature même de ces courants et ne sera évité que par les *courants continus*, dont l'emploi est d'ailleurs bien plus général dans les applications électriques.

Nous avons réservé pour la fin les objections les plus graves contre l'emploi de l'éclairage électrique.

La pile hydro-électrique n'étant pas un appareil pratique et économique pour cette application, la pile thermo-électrique étant encore dans la période d'expériences, on ne peut employer, pour produire le courant, que les machines électro-dynamiques, ce qui oblige, la plupart du temps, à installer un moteur à vapeur ou à gaz, et amène à sa suite tous les inconvénients propres à ces appareils, chauffeur, mécanicien, entretien des machines, mise en marche, etc., etc.

Voilà l'inconvénient le plus grave, et en réalité le seul sérieux. Il disparaît néanmoins dans certaines usines où l'on emprunte la force motrice à la transmission générale. Dans ce cas, l'éclairage électrique ne présente au contraire que des avantages. Dans d'autres, on a fait en petit ce qu'ont fait en grand les compagnies du gaz. On a créé de véritables *usines électriques*, comme à l'Hippodrome de Paris, aux magasins du Louvre et pour l'éclairage de l'avenue de l'Opéra. La solution de la question ne se trouve-t-elle pas dans la création d'*usines centrales d'électricité* distribuant le courant électrique dans des conditions analogues à celles du gaz? En attendant la réalisation prochaine de cette idée, les avantages de la lumière électrique sont si importants qu'on a passé outre sur ce grave inconvénient. Machines à vapeur, moteurs à gaz, moteurs hydrauliques sont aujourd'hui employés spécialement et *exclusivement* pour l'éclairage électrique et le nombre s'en accroît chaque jour.

Restent les questions du prix de revient et de la division des foyers que nous allons maintenant examiner.

Prix de revient de la lumière électrique. — Rien n'est plus variable que le prix de revient de la lumière électrique. L'on nous a souvent demandé si l'électricité coûtait moins cher que le gaz et l'on s'est étonné de notre embarras pour répondre à cette question. Suivant les cas, l'électricité peut coûter dix fois moins que le gaz, ou, au contraire, dix fois plus : nous en citerons quelques exemples.

Dans une usine qui dispose d'une force motrice à vapeur ou hydraulique, il ne coûte presque rien de prendre quelques che-

vaux sur l'arbre de transmission et de les employer à mettre en mouvement une machine Gramme, par exemple, alimentant un régulateur Serrin, une série de régulateurs à division ou de lampes à incandescence. La dépense dans ce cas se réduit presque uniquement à l'amortissement de la machine et des lampes, et à la combustion des charbons. Dans ces conditions, l'éclairage électrique, s'il est bien combiné, est à tous les points de vue supérieur au gaz. Pour les mêmes raisons, il sera économique de l'employer à bord des navires où la vapeur ne fait jamais défaut, l'éclairage à l'huile et à la bougie étant relativement très dispendieux. Si, en poussant les choses à l'extrême, on installe au contraire une machine à vapeur pour un seul générateur et un foyer unique, la dépense se trouve hors de proportion avec le résultat ; l'amortissement, la surveillance et l'entretien sont considérables, et le gaz reprend haut la main tous ses avantages.

En multipliant le nombre des foyers alimentés par une machine motrice unique, la disproportion s'efface peu à peu, et lorsqu'on crée, comme au Louvre et à l'Hippodrome de Paris, une puissante usine électrique, l'économie reparaît de nouveau.

Si l'on a recours aux piles, — la pile Bunsen est jusqu'à présent la seule qui ait reçu des applications à l'éclairage, — le prix de revient devient énorme ; il atteint 3 francs par heure pour 60 éléments, sans compter la main-d'œuvre, d'après les expériences de Becquerel.

Les moteurs à gaz, employés dans une certaine mesure, ont rendu l'éclairage électrique économique à cause de leur facilité de mise en marche et d'arrêt et parce qu'ils ne consomment que lorsqu'ils travaillent. Citons, comme exemple, la photographie à l'électricité.

On retrouve dans ce cas une réelle économie, car si un bec de gaz est un appareil d'éclairage simple et commode, il faut avouer que son rendement lumineux est détestable. En brûlant directement 4 mètres cubes de gaz, on peut produire 40 becs Carcel *au plus* lorsqu'on veut des foyers divisés. En dépensant cette même quantité de gaz dans un moteur Otto, on produirait

une force de quatre chevaux-vapeur qui, transformée en électricité par une machine Gramme et en lumière par un régulateur Serrin, fournirait une puissance lumineuse de plus de 300 becs Carcel, tout en dégageant 150 fois moins de chaleur.

Ces chiffres montrent que si les becs de gaz divisent la lumière, ils ne le font pas sans une certaine perte et sans un gaspillage fort important, de même ordre que celui des lampes à incandescence, et dont on ne tient généralement pas assez compte dans les comparaisons.

D'après M. Picou, dont les appréciations nous paraissent fort exactes, une lampe Serrin alimentée par une machine Gramme (type A) peut éclairer 250 à 500 mètres carrés d'un atelier où se font des travaux minutieux, de 500 à 1,000 mètres carrés d'un atelier de mécanique et 2,000 mètres carrés d'un chantier.

Le capital engagé par cette installation serait de 2,300 francs et la dépense par heure — en supposant 500 heures d'éclairage par an, se répartirait ainsi :

Charbon à lumière	0^{fr},21
Charbon pour force motrice	0 ,15
Entretien et surveillance	0 ,10
Amortissement de 2,300 fr. pour 500 heures	0 ,46
Total	0 ,92

Si l'on éclaire toutes les nuits, c'est-à-dire 4,000 heures par an, le prix s'abaisse à 53 centimes. Avec un moteur hydraulique on ne dépense plus que 0^{fr},77 pour un éclairage de 500 heures et 0^{fr},38 pour un éclairage de 4,000 heures.

Nous avons donné ces chiffres seulement à titre d'indication, car ils varient à l'infini avec les conditions particulières à chaque installation.

LA DIVISION DE LA LUMIÈRE.

Les développements de la lumière électrique, depuis quelques années, sont considérables ; ils sont cependant de peu d'importance comparés à ceux que l'avenir leur réserve : ces dévelop-

pements sont liés à la question aujourd'hui à l'ordre du jour, et déjà en partie résolue, la *division de la lumière,* et la *distribution de l'électricité.*

Il est évident, en effet, que si l'on parvient à créer de petits foyers électriques économiques, et, d'un autre côté, si l'on installe des usines électriques distribuant le courant là où il est nécessaire, et en toutes quantités, comme on distribue aujourd'hui le gaz, on aura du coup éliminé les inconvénients de l'éclairage électrique pour ne plus laisser subsister que ses avantages.

Il n'y a aucune témérité à prévoir la réalisation de cette révolution industrielle ; la multiplicité même des solutions proposées montre qu'elle est possible, les intéressants résultats déjà obtenus indiquent qu'elle sera prochaine. Les progrès à réaliser sont de deux ordres très différents. Il faut en effet étudier, d'une part, la division du courant et, d'autre part, la bonne utilisation de ce courant avec des foyers convenablement appropriés. La tendance actuelle est, constatons-le avec plaisir, de ne plus séparer ces deux ordres de recherches, et la plupart des inventeurs complètent leur œuvre en étudiant des machines dont les qualités spéciales s'accordent bien avec celles qu'exigent leurs foyers.

C'est ainsi, par exemple, que la bougie Jablochkoff, qui fonctionnait d'abord avec les machines de l'*Alliance*, emploie aujourd'hui presque exclusivement les machines Gramme à courants alternatifs, *une* seule machine peut, suivant ses dimensions, alimenter de *quatre* à *soixante* bougies disposées, dans ce dernier cas, en douze séries de cinq bougies chacune.

Les courants alternatifs des machines Lontin alimentent jusqu'à *douze* régulateurs de Mersanne, en circuit, les machines Siemens entretiennent vingt foyers disposés sur deux circuits seulement. Les bougies Wilde et Jamin, les lampes Gramme, Weston, Rapieff, Gérard, etc., fournissent des résultats analogues, au point de vue de la division.

Les machines à courants continus permettent aussi le fractionnement des foyers, soit avec l'arc voltaïque, soit par l'incandescence.

La machine Brush alimente *quarante* régulateurs montés *en tension* sur le même circuit. C'est le résultat le plus remarquable qu'on ait obtenu jusqu'ici au point de vue du nombre des appareils à *arc voltaïque* disposés sur un seul circuit. Tous les régulateurs différentiels permettent d'ailleurs cette division, à la condition que le courant fourni par la machine ait assez de tension pour franchir les résistances que ces arcs présentent.

Avec l'éclairage par incandescence, on obtient des résultats de division encore plus remarquables. Une machine Gramme d'atelier (type A) alimente facilement douze lampes Reynier en un seul circuit ou douze lampes Werdermann en deux circuits de six lampes chacun. Enfin, avec l'incandescence pure, le nombre des foyers qu'on peut alimenter est illimité, et l'on est arrivé à brancher plus de *mille* foyers sur une seule canalisation alimentée par un seul générateur électrique.

Les méthodes employées jusqu'ici pour la division des foyers à arc voltaïque font défaut par un point qu'il importe de signaler : elles ne réalisent pas, en général, une des conditions essentielles d'un éclairage absolument divisé, il leur manque l'indépendance des foyers alimentés par une source donnée : l'extinction d'une bougie Jablochkoff, par exemple, provoque celle de toutes les autres placées dans le même circuit ; l'extinction ou l'allumage voulus d'un foyer influe sur tous les autres pour accroître ou diminuer l'intensité lumineuse.

L'arc voltaïque ne permet pas non plus une graduation convenable de la lumière ; il faut en effet, pour entretenir un arc voltaïque, une certaine *tension* minimum et un *volume* minimum d'électricité, dépendant de la grosseur des charbons, au-dessous desquels l'arc s'éteint complètement. Il semble donc bien établi aujourd'hui que la division de la lumière par petits foyers est réservée, malgré son prix relativement plus élevé, à l'incandescence de charbon ou de toute autre substance pouvant jouer un rôle analogue.

Quant à la division du courant faite dans des conditions de nature à donner à toutes les lampes alimentées par une même

source électrique une indépendance absolue, elle peut s'obtenir aujourd'hui très aisément. Si l'on veut bien se reporter à ce que nous avons dit sur le mode d'excitation des inducteurs des machines dynamo-électriques à courant continu, on verra que les éléments d'une circulation électrique, tension et quantité, sont très variables avec la résistance du circuit.

Il en résulte tout naturellement que tout changement apporté dans cette résistance, par l'augmentation ou la diminution du nombre des appareils alimentés, réagit aussitôt sur la source électrique, apporte une perturbation dans les rapports des facteurs et influe sur tous les autres foyers. Il faut donc disposer la source électrique dans des conditions telles que ces réactions nuisibles ne puissent plus s'exercer. Cela est possible à l'aide de dispositions dont nous allons indiquer le principe par une comparaison. Concevons un grand bassin rempli d'eau devant distribuer de l'eau dans une ville par un grand nombre de tuyaux de différentes sections. Pour obtenir dans chacun de ces tuyaux un écoulement constant, quel que soit le débit de tous les autres, il faut maintenir toujours le même niveau dans le bassin.

L'écoulement dans chaque conduite ne dépendant que de la hauteur de l'eau dans le bassin sera indépendant du débit des autres conduites.

En électricité, la question se réduit à maintenir une *pression électrique* ou une *différence de potentiel* constante entre deux points donnés et de brancher toutes les lampes entre ces deux points.

Nous examinerons la question à un point de vue plus général à propos de la distribution de l'électricité, mais nous voulons faire connaître dès à présent les solutions partielles qui en ont été données *pour la division de la lumière*, par MM. *Edison* et *Maxim*.

Système Édison. — Dans le système Edison, toutes les lampes à incandescence sont branchées en dérivation sur un ou une série de conducteurs principaux branchés aux bornes de la machine. Les inducteurs sont excités en dérivation (voir p. 80),

la force électro-motrice de la machine dépend de la puissance du champ magnétique dans lequel tournent les inducteurs, c'est-à-dire, de la puissance du courant qui les traverse.

On peut donc régler cette force électro-motrice en introduisant ou en enlevant des résistances dans le circuit d'excitation. Dans le système Edison, cette opération s'effectue *à la main*, à l'aide d'un rhéostat à manette.

Le diagramme ci-dessus montre la disposition des circuits et

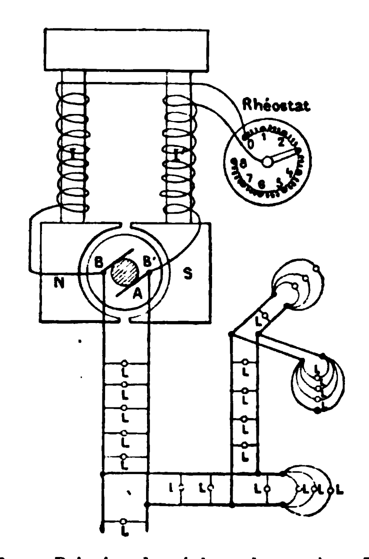


Fig. 80. — Principe du réglage du système Edison.

A. Induit. BB'. Balais où sont branchés les conducteurs. — I,I'. Inducteurs. — L. Lampe à incandescence. — La puissance du champ magnétique fermé par F. S. dépend de la position du rhéostat sur les contacts 1, 2, 3 au 8.

permet de comprendre le mode d'action du rhéostat. La manœuvre de ce rhéostat demande une surveillance continue : le réglage n'est pas automatique.

Système Maxim. — Le système de M. Hiram-Maxim est plus complet que celui d'Edison, car il comporte un réglage automatique effectué par la machine elle-même suivant les variations qui se produisent dans le nombre des circuits alimentés.

Le diagramme (fig. 81) montre le montage et la figure 82 l'en-

semble du *régulateur* proprement dit. M. Maxim excite un certain nombre de machines dynamo-électriques, — trois par exemple, — par une quatrième machine séparée. Les trois machines productrices sont branchées en dérivation, et les lampes elles-mêmes sont aussi branchées en dérivation sur les conducteurs principaux. Pour comprendre l'action du régulateur de M. Maxim, supprimons-le d'abord par la pensée et déplaçons à la main les balais collecteurs de l'excitatrice pendant que l'ensemble des machines, génératrices et excitatrices, est en mouvement.

En se reportant au mode de fonctionnement de la machine

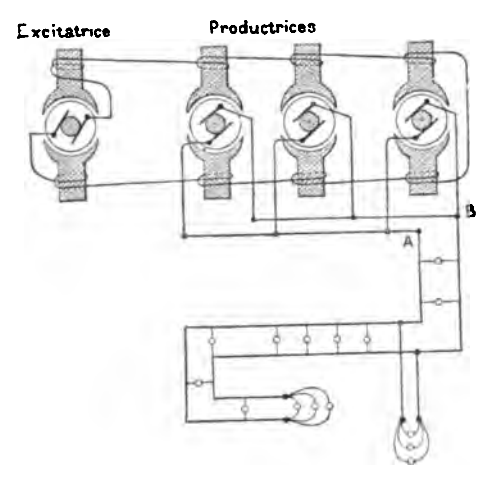


Fig. 81. — Montage des machines Maxim.

Gramme, on peut voir que le courant sera maximum lorsque les balais toucheront le collecteur suivant un diamètre *vertical*.

Lorsque les balais seront placés suivant un diamètre *horizontal*, c'est-à-dire toucheront les points *neutres*, il n'y aura plus aucun courant. Le déplacement des balais dans un angle d'environ 90° aura donc pour effet de faire passer le courant produit par l'excitatrice par toutes les valeurs, depuis 0 jusqu'à sa valeur maxima. Les champs magnétiques des machines génératrices varieront de puissance dans le même rapport que le courant produit par l'excitatrice. Comme la force électro-motrice des génératrices, pour

une vitesse donnée et constante, est liée à la puissance des champs magnétiques dans lesquels se meuvent les induits, il en résulte finalement que tout décalage des balais de l'excitatrice réagit aussitôt sur les génératrices pour augmenter ou diminuer leur puissance.

Le régulateur de M. Maxim est un appareil qui change *automatiquement* le calage des balais et proportionne à chaque instant la puissance du champ magnétique des génératrices au nombre de foyers alimentés.

Régulateur. — Il est facile maintenant de comprendre comment fonctionne le régulateur (fig. 82). La partie supérieure de l'excitatrice porte deux électro-aimants ; nous n'en considérons qu'un seul pour le moment, le second ayant un rôle absolument distinct du premier. Cet électro-aimant est roulé de fil fin dont les extrémités sont reliées aux deux bornes de la machine génératrice d'où partent les conducteurs aboutissant aux lampes. L'armature de l'électro est fixée à un levier horizontal dont la course est limitée par deux vis-butoirs représentées sur la droite : un ressort antagoniste, dont on règle la tension à l'aide d'une vis, équilibre l'action de l'électro-aimant sur l'armature. L'extrémité du levier de l'armature est reliée par un fil métallique un peu élastique à un levier horizontal portant deux petites dents et recevant un mouvement de va-et-vient à l'aide d'une petite bielle et de transmissions par cordes qui relient l'arbre de la petite bielle (fig. 82) à l'arbre de l'excitatrice et lui communiquent un mouvement de rotation relativement lent. Ce levier horizontal se meut entre deux roues dentées comme les roues à rochet.

Dans la position normale de l'armature et du levier qui lui est relié, ce levier se meut librement dans l'espace laissé entre les deux roues dentées, n'entraînant ni l'une ni l'autre. Supposons par exemple qu'on éteigne deux ou trois lampes. Le courant est alors trop intense pour les lampes restantes. L'électro-aimant attire son armature, le levier denté s'abaisse et la dent inférieure vient s'engager sur la roue dentée inférieure, le mouvement de va-et-vient lui communique une rotation dans un sens déterminé

tel que, à chaque tour de l'arbre de la petite bielle, il se produise un petit mouvement de rotatation qui se transmet aux balais par une série de transmissions par engrenage représentées fig. 82. Dans ces conditions les balais changent de calage, ils se rapprochent du point neutre, le courant excitateur s'affaiblit et, par suite, le courant engendré par la génératrice s'affaiblit aussi. Ces décalages élémentaires, pour ainsi dire, se produisent jusqu'à ce que le courant ait pris la nouvelle valeur qui convient au nombre de lampes en fonction. L'électro-aimant relâche alors l'armature et le levier denté reprend sa position normale entre les deux roues dentées, à égale distance de chacune d'elles. Si on rallume de nouvelles lampes, le courant faiblit, l'armature sollicitée par le ressort antagoniste s'éloigne encore, le levier denté agit cette fois sur la roue dentée *supérieure,* et la même transmission par engrenages décale les balais en sens inverse, pour les rapprocher des points maxima, augmenter la puissance des inducteurs, et par suite la force électro-motrice de la machine génératrice.

Le ressort antagoniste constitue en fin de compte le réglage général de l'ensemble du système. Il suffit d'augmenter un peu sa tension pour régler l'intensité de tous les foyers alimentés par la machine : en la diminuant on l'abaisse jusqu'à ramener les lampes à de simples veilleuses et même jusqu'à les éteindre complètement.

Nous venons de dire que le régulateur de M. Maxim était très sensible. C'est une qualité accompagnée malheureusement d'un bien gros défaut ; le régulateur est sensible, mais son action est trop lente. Si l'on éteignait subitement un trop grand nombre de lampes, l'intensité serait trop grande dans les foyers restants, leur puissance augmenterait subitement, il en résulterait la rupture de quelques lampes trop surchauffées par l'accroissement subit du courant qui les traverse.

Dans le système de M. Maxim, le remède, ou plutôt le palliatif, est à côté du mal. Ce palliatif consiste en une véritable *soupape de sûreté* que l'inventeur a ajouté à son régulateur en dis-

posant le deuxième électro-aimant qu'on voit sur la partie supérieure de la figure 82.

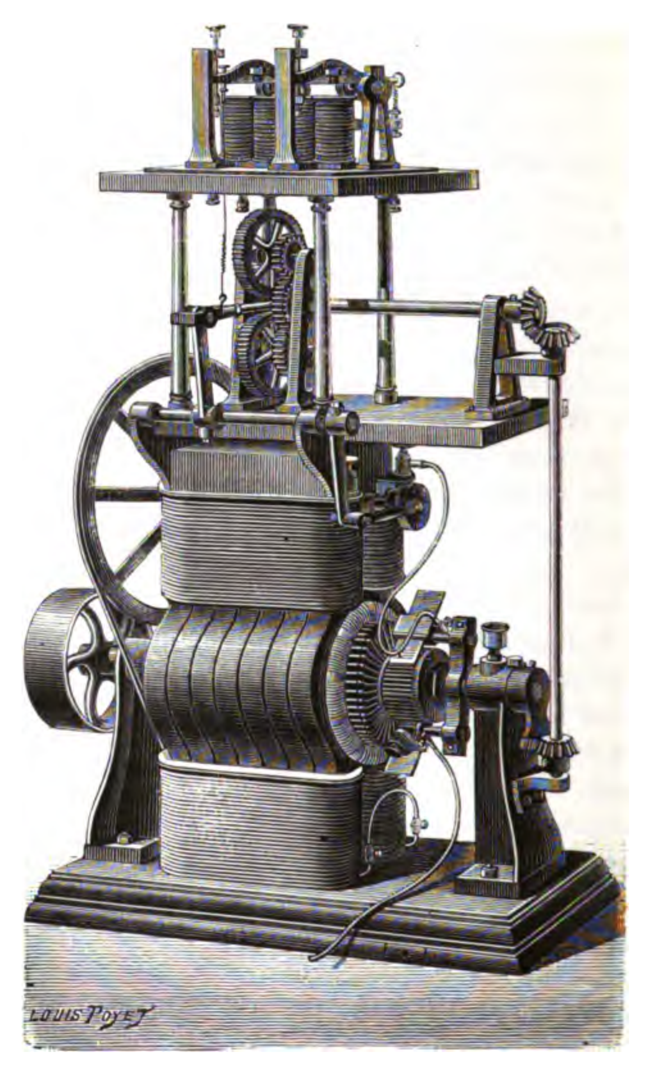


Fig. 82. — Machine excitatrice et régulateur du système Maxim.

Ce denxième électro-aimant est semblable au premier et est placé dans le même circuit que le premier que nous avions tout

d'abord, pour faciliter l'explication, supposé attaché directement aux bornes de la série des machines génératrices. Son armature est montée sur un levier identique et est aussi réglée par un ressort dont la tension est un peu supérieure à celui du régulateur. Si le courant qui traverse les deux électros à la fois est assez intense pour attirer l'armature du deuxième électro-aimant, elle abaissera le levier. Ce levier, en s'abaissant, réunira les deux balais de la même excitatrice *directement*, il formera un *shunt* et mettra la bobine en court circuit. Dans ces conditions, les inducteurs de l'excitatrice et de la génératrice ne recevront plus aucun courant, la génératrice ne fournira plus elle-même de courant, les lampes diminueront graduellement d'intensité, on aura une extinction partielle de quelques secondes, mais les lampes seront sauvées. Il faut que M. Maxim ait bien senti que le régulateur ne pouvait pas agir efficacement dans tous les cas possibles pour avoir ajouté à son régulateur un moyen de protection aussi radical. Hâtons-nous de dire que, pratiquement, la soupape de sûreté n'a que très rarement occasion de fonctionner, et qu'elle est surtout utile dans le cas où il y aurait rupture brusque d'un conducteur principal, ou tout autre accident analogue.

A propos de la *distribution de l'électricité*, nous ferons connaître les solutions plus complètes qui ont été proposées dans le cas d'une distribution *générale* pour toutes les applications, avec des recepteurs variables par leur nombre, leur puissance, leur nature et les applications auxquelles ils sont destinés : nous donnerons quelques chiffres moyens indiquant la nature des courants exigés par chaque foyer pour fonctionner dans des conditions normales. Les résultats déjà acquis montrent que la division de la lumière et du courant ne présentent plus aujourd'hui de difficultés sérieuses et l'on peut espérer qu'avant quelques années, cet éclairage sera devenu une des nécessités de la vie domestique. Le passé répond ici de l'avenir.

TROISIÈME PARTIE

TÉLÉPHONES ET MICROPHONES PHOTOPHONES ET RADIOPHONES

On désigne sous le nom général de *téléphone* tout appareil permettant de transmettre à distance un son quelconque, mélodie, bruit, chant, voix humaine, etc.

On peut cependant, avec M. Preece, diviser ces appareils en deux grandes classes, eu égard aux résultats obtenus :

1° Les *téléphones musicaux* (*tone telephone*) sont les instruments employés pour la transmission des sons mélodiques ; ce sont des appareils historiques, naturellement incomplets et incapables de reproduire les nuances délicates des sons de toute nature.

2° Les *téléphones d'articulation* (*articulating telephone*), ou téléphones proprement dits, sont ceux employés pour la transmission de la voix humaine et des sons de toute nature.

Les microphones, comme nous le verrons plus tard, se rangent tout naturellement dans les téléphones et il n'y a pas lieu d'en faire une classe distincte.

Comme les téléphones musicaux sont les premiers dans l'ordre historique et qu'ils sont les plus simples, c'est par eux que nous commencerons l'étude des appareils téléphoniques.

Dans un chapitre spécial, nous étudierons quelques appareils téléphoniques dans lesquels le transmetteur, le récepteur, et quelquefois même la ligne, se présentent dans des conditions si singulières qu'on ne pourrait leur trouver une place bien définie dans une classification méthodique.

CHAPITRE I

TÉLÉPHONES MUSICAUX

C'est à l'année 1837 qu'il faut faire remonter le principe des téléphones musicaux. A cette époque, un physicien américain, *Page*, découvrit que la rapide aimantation et désaimantation de barres de fer produisait ce qu'il appelait de la *musique galvanique*. Le son émis par la barre de fer dépendait du nombre d'aimantations et de désaimantations produites dans une seconde.

De la Rive, de Genève, en 1843, augmenta les effets des *vibrations de Page*, — comme on désigne quelquefois ce phénomène, — en employant des fils de grande longueur placés dans des bobines.

Plus tard, *Sullivan* découvrit que la vibration d'un fil composé de deux métaux engendrait un courant électrique qui durait autant que la vibration elle-même, mais cette découverte ne reçut aucune application pratique et serait tombée dans l'oubli sans les recherches de M. *Bell* au moment où il prépara l'historique des travaux antérieurs à sa merveilleuse invention. En 1855, M. *Léon Scott, de Martinville,* imagina un appareil auquel il donna le nom de *phonautographe*, qui se composait en principe d'une peau tendue vibrant sous l'influence de la voix, du chant, d'un bruit quelconque. Cet appareil était destiné à l'inscription *graphique* des vibrations. C'est l'origine de la plaque vibrante du téléphone.

Téléphone musical de M. Reiss. — En 1860, M. Reiss imagina un appareil permettant de faire parvenir à de grandes

distances la mélodie qui ne devait être entendue qu'en un lieu déterminé.

Cet appareil est une combinaison heureuse des vibrations de Page et de la membrane du phonautographe de Scott. Le dispositif adopté par M. Reiss, est représenté par les deux figures ci-après. La figure 83 montre l'appareil de transmission, la figure 84 celui de réception. A la station où est joué l'air musical (fig. 83), un gros tube T débouchant dans une boîte K reçoit les vibrations de l'air produites par l'instrument. La boîte a pour



Fig. 83. — Appareil transmetteur du téléphone Reiss.

K, boite pour recueillir les vibrations ; — *m*, membrane de caoutchouc fermant la boite (on a découpé la partie supérieure de la boite) ; — *o*, disque de platine collé sur la membrane ; — *abc*, levier mobile, portant par la pointe sur la membrane ; — *ts*, clefs de manipulation pour la correspondance ; — EE, électro-aimant récepteur, pour la correspondance ; — 2, 1, vis de pression pour attacher les fils de communication avec la pile et avec la ligne ; — T, embouchure.

effet de recueillir et de renforcer le son. A la partie supérieure est tendue une membrane *m* qui vibre a l'unisson des ébranlements qu'elle reçoit. Pour transformer les mouvements de cette membrane en des émissions et des interruptions cadencées d'un courant électrique, il suffit d'établir un jeu de communications facile à concevoir.

Supposons qu'une pile, dont l'un des pôles est la terre, soit attachée par l'autre électrode avec le bouton marqué 2 sur la figure ; de là, un conduit métallique formé par une mince lame de cuivre *i* et aboutissant à un disque de platine *o* amène le courant en face d'une pointe portée par le levier *abc*. Chaque fois

que la membrane *m* sera soulevée, la pointe touchant le disque, le courant sera établi ; il sera interrompu au contraire lorsque la membrane reviendra au repos.

Pour transmettre à une distance quelconque, 100, 200, 500 kilomètres, le courant électrique, il faut une ligne partant du bouton 1 (fig. 83) et rattachée au bouton 3 (fig. 84), qui représente l'appareil de réception. Ce dernier est constitué par une tige de fer *dd* autour de laquelle sont enroulées des spires de fil de cuivre isolées les unes des autres, une des extrémités du fil aboutit au

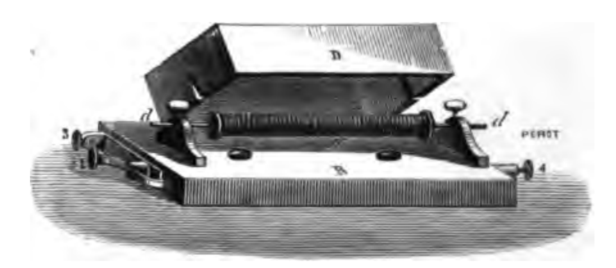


Fig. 84. — Appareil récepteur du téléphone Reiss.

B, boite pour renforcer les vibrations ; — D, couvercle de cette boite ; — *dd*, fil de fer vibrant par le passage du courant ; — *q*, bobine à travers laquelle passe le courant ; *t's'*, clef de manipulation pour la correspondance ; — 1, 2, 3, vis de pression pour attacher les fils de communication avec la pile et avec la ligne.

bouton 3 et l'autre à la terre par la vis 4 afin de compléter le circuit de la pile du poste de départ.

La tige *dd* a la dimension d'une aiguille à tricoter ; la bobine *q*, constituée par l'assemblage du fil enroulé et de la tige, est portée sur une boîte creuse B dont les parois sont très minces. Au dessus est un couvercle D ; l'ensemble de ce dispositif a pour but de renforcer les vibrations que produisent les interruptions successives du courant à travers la tige *dd*. On les perçoit ainsi plus nettement par l'artifice qui augmente l'intensité des notes données par les cordes d'un piano, lorsque la caisse a une résonnance convenable.

Pour donner au téléphone toute sa valeur, il faut étudier la forme à donner à la boîte K ; les meilleures dispositions trouvées jusqu'à présent consistent à recourber les parois afin d'am-

plifier l'effet sur la membrane par des réflexions successives. On a réussi aussi à augmenter la puissance du récepteur en introduisant dans la bobine plusieurs tiges de fer ; le son, primitivement nasillard, a acquis ainsi un timbre plus agréable.

L'appareil de M. Reiss que nous venons de décrire fut successivement perfectionné par M. *Yeates*, M. *Van der Weyde*, MM. *Cécil* et *Léonard Wray*, tout en restant cependant un appareil purement musical, de même que le téléphone musical d'*Elisha Gray*.

Tous ces appareils sont aujourd'hui dépassés par le téléphone d'articulation que nous allons maintenant étudier, mais nous devons signaler encore un appareil assez original par la forme de son récepteur et qui rentre, par la nature des résultats qu'il produit, dans la classe des téléphones musicaux. Nous voulons parler du condensateur chantant.

Condensateur chantant. — Le principe de cet appareil est dû à M. *Varley*, qui le découvrit dès 1870, mais il a été combiné d'une manière très simple par MM. *Pollard* et *Garnier* qui lui ont donné une forme pratique.

Le récepteur se compose d'un condensateur formé de trente feuilles de papier superposées, de 9 centimètres sur 13, entre lesquelles sont intercalées vingt-huit feuilles d'étain de 6 centimètres sur 12, réunies de manière à constituer les deux armatures du condensateur. A cet effet les feuilles paires sont réunies ensemble à l'un des bouts du cahier de papier et les feuilles impaires à l'autre bout. En appliquant ce système sur un carton rigide, après avoir eu soin de le ligaturer avec une bande de papier, et en serrant les feuilles d'étain réunies aux deux bouts du condensateur avec deux garnitures de cuivre, munies de boutons d'attache pour les fils du circuit, on obtient ainsi un appareil qui joue le rôle d'un véritable chanteur.

L'appareil transmetteur se compose d'une sorte de téléphone sans manche, dont la lame vibrante est constituée par une lame de fer-blanc très mince, au centre de laquelle est soudé un morceau cylindrique de charbon : contre ce charbon appuié un

autre cylindre de la même matière, qui est porté par une traverse de bois, articulée, d'un côté, sur le bord inférieur de la boîte du téléphone et fixée, de l'autre côté, sur le bord opposé de la boîte, au moyen d'une vis de réglage. Un ressort arqué (un bout de ressort de pendule), placé en travers de cette pièce, lui donne une certaine élasticité sous son serrage : cette élasticité est nécessaire pour le fonctionnement de l'appareil.

La lame de fer est mise en rapport avec l'un des pôles d'une pile, et le charbon inférieur correspond à l'hélice primaire d'une bobine d'induction déjà reliée au second pôle de la pile. Enfin, les deux bouts de l'hélice secondaire de la bobine sont reliés directement aux deux armatures du condensateur.

Pour obtenir le chant sur le condensateur, il faut régler le transmetteur de manière que les deux charbons ne se touchent pas à l'état normal, mais soient assez près l'un de l'autre pour que, en chantant, les vibrations de la plaque puissent effectuer des contacts suffisants. On arrive facilement à ce réglage par le tâtonnement et en émettant une même note jusqu'à ce que le condensateur résonne. Si trois notes faites successivement sont bien reproduites, l'appareil peut être considéré comme suffisamment réglé, et pour le faire fonctionner il suffit d'enfoncer la bouche dans l'embouchure, comme on le fait quand on chante dans un mirliton. Il faut, pour obtenir un bon résultat, que l'on entende la lame de l'appareil vibrer à la manière des flûtes à l'oignon. Au lieu des charbons, on peut employer des contacts de platine.

Des perfectionnements nouveaux ont permis de transformer le condensateur en un véritable téléphone d'articulation ; c'est le *condensateur parlant.* Nous y reviendrons dans le chapitre consacré aux téléphones spéciaux. Tous les téléphones musicaux ne sont plus considérés aujourd'hui que comme des objets de curiosité ou des appareils de cabinets de physique ; aussi ne nous y arrêterons-nous pas davantage, mais il était utile de leur consacrer quelques pages, car ils ont devancé, et en quelque sorte préparé la découverte des téléphones d'articulation.

CHAPITRE II

TÉLÉPHONES D'ARTICULATION

OU TÉLÉPHONES PARLANTS

C est l'admirable appareil du professeur *Graham Bell* qui a résolu le premier, par des procédés d'une merveilleuse simplicité, le problème de la transmission électrique de la parole à distance. Le téléphone de *Bell*, breveté par son inventeur le 14 février 1876, a paru pour la première fois à l'Exposition de Philadelphie, et le célèbre physicien anglais, sir William Thomson, à une époque où l'invention rencontrait bien des incrédules, a signalé l'appareil de M. *Bell*, en le désignant sous le nom de *merveille des merveilles*. Avant d'analyser les travaux qui ont conduit M. Bell à sa découverte, il convient de passer rapidement en revue les travaux antérieurs et l'état de la question au moment où l'heureux inventeur poursuivait ses recherches.

Téléphone à ficelle. — Si nous laissons de côté les tuyaux acoustiques qui ne constituent en quelque sorte qu'une canalisation de la voix humaine dans un tuyau, le premier téléphone digne de ce nom est le *téléphone à ficelle* dont l'invention remonte à plus de deux siècles déjà.

Comme nous le verrons par la suite, le problème de la téléphonie se résume en ceci : Faire vibrer synchroniquement, par un moyen quelconque, deux objets placés à une certaine distance.

Le moyen le plus simple est de prendre deux tubes cylindri-

ques en métal ou en carton, de disposer à une des extrémités de chacun d'eux une membrane en papier, parchemin ou carton mince et de relier les deux lames vibrantes ainsi constituées par une ficelle fixée au centre par un nœud.

Lorsque la ficelle qui réunit les deux parties est bien tendue, qu'elle n'est pas trop longue, si l'on applique l'un des tubes contre l'oreille et qu'une seconde personne parle très près de l'embouchure de l'autre tube, toutes les paroles sont transmises par la ficelle à la membrane du récepteur et l'on peut converser presque à voix basse par ce moyen.

Il y a ainsi transmission *mécanique* des vibrations et mouvement synchronique des deux membranes.

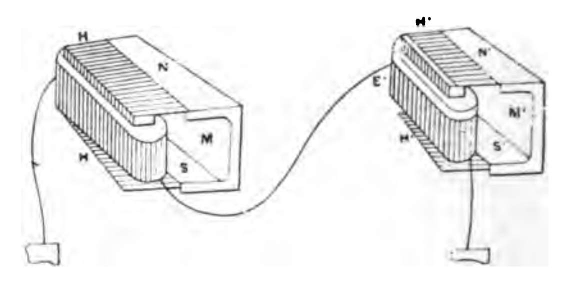


Fig. 85. — Première forme du téléphone d'articulation de M. Bell.

La parole peut ainsi être transmise jusqu'à deux cents mètres. Les téléphones à ficelle sont restés longtemps dans l'oubli et n'ont été remis à la mode que pendant ces dernières années.

C'est M. *Charles Bourseul* qui émit pour la première fois, en 1854, l'idée de transmettre électriquement la parole à distance, et M. le comte du Moncel déclare, dans son ouvrage sur le téléphone, que cette idée fut regardée alors comme un rêve fantastique.

Depuis la note de M. Bourseul, jusqu'au téléphone de M. Bell qui parut pour la première fois à l'Exposition de Philadelphie en 1876, la plupart des recherches aboutissent à la création des téléphones musicaux. Les recherches de Helmholtz sur la synthèse des sons ouvrirent la voie aux téléphones d'articulation.

Nul d'ailleurs n'était mieux préparé que M. *Graham Bell* pour entreprendre cette étude et l'amener au but avec le succès que l'on sait ; car l'invention du téléphone est le résultat d'une longue suite de travaux que M. Graham Bell partageait déjà avec son père M. *Alexandre Melville Bell*, d'Édimbourg. Il commença par l'étude des sons des voyelles, fit des expériences parallèles à celles d'Helmholtz sur la reproduction artificielle des voyelles au moyen de diapasons électriques, combina un harmonica électrique à clavier, un Morse à audition ou *sounder*, et enfin se livra tout entier à l'étude de la reproduction électrique de la parole. L'ensemble des recherches de M. Graham Bell sur le téléphone a fait l'objet d'un mémoire que l'auteur a lu devant la Société des ingénieurs télégraphistes de Londres, le 31 octobre 1877. Il a été reproduit *in extenso* dans *la Nature* (avril 1878).

Après avoir exposé avec une remarquable impartialité l'ensemble des recherches antérieures faites dans la même direction par ses prédécesseurs et des considérations générales sur les courants ondulatoires qui ne sauraient trouver place ici, l'inventeur expose ainsi la première forme de téléphone qu'il avait imaginée :

L'appareil représenté figure 85 fut ma première forme de téléphone articulé. Dans cette figure, une harpe à tiges d'acier est attachée aux pôles d'un aimant permanent NS. Lorsque l'une quelconque des tiges est mise en vibration, un courant ondulatoire est produit dans les bobines de l'électro-aimant ; l'électro-aimant correspondant E' attire les tiges de la harpe H' avec une force variable, et met en vibration celle des tiges qui se trouve à l'unisson de la tige qui vibre à l'autre extrémité du circuit. Ce n'est pas tout ; l'amplitude de vibration dans l'une des tiges détermine l'amplitude de vibration dans l'autre, car l'intensité du courant induit est déterminée par l'amplitude de la vibration inductrice, et l'amplitude de la vibration à l'extrémité de réception dépend de l'intensité des impulsions attractives. Lorsque nous chantons dans un piano, certaines cordes de l'instrument sont mises en vibration avec sympathie par l'action de la voix, et, à différents degrés d'amplitude, un son approché de la voyelle proférée part du piano. La théorie nous fait voir que si le piano avait un nombre beaucoup plus considérable de cordes à l'octave, les sons de voyelles seraient parfaitement reproduits. Mon idée de l'action de l'appareil, action ind quée figure 85, était

la suivante : proférer un son dans le voisinage de la harpe H', et certaines tiges seraient mises en vibration à des amplitudes différentes. A l'autre extrémité du circuit, les tiges correspondantes de la harpe H' vibreraient avec leurs relations propres de force, et le *timbre* du son serait reproduit. La dépense de la construction d'un semblable appareil m'empêcha de m'engager dans cet ordre de recherches.

Après avoir passé en revue les premiers appareils qu'il construisit pour reproduire la parole à distance, M. Bell décrit l'appareil qui fut exposé à Philadelphie en 1876.

Dans cet appareil, le transmetteur ou parleur (fig. 86) était

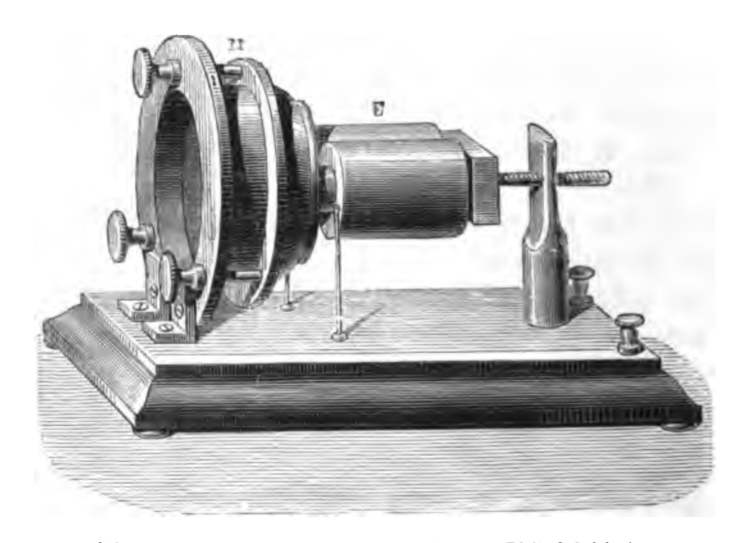


Fig. 86. — Télégraphe parlant de M. Bell à l'exposition de Philadelphie (transmetteur).

constitué par un électro-aimant E et une membrane vibrante M sur laquelle M. Bell plaçait, en guise d'armature, des ressorts de pendule de la grandeur de l'ongle d'un pouce. Le récepteur (fig. 87) était formé d'un électro-aimant tubulaire de Nicklès F sur lequel était fixée par une vis une légère armature en tôle, de l'épaisseur d'une feuille de papier fort, qui agissait comme vibrateur, un petit pont placé sur le socle formant caisse sonore.

Remarquons cependant que cet appareil, ainsi constitué, n'était pas un téléphone électro-magnétique, car on disposait dans

le circuit reliant les deux appareils une pile de quelques éléments. Le son n'était transmis que par une sorte d'induction produite par l'armature sur le courant de la pile traversant l'électro-aimant E du transmetteur. Cet appareil permit à M. Bell et à son ami M. Watson d'obtenir des transmissions téléphoniques qui leur indiquèrent la bonne voie.

« Je me souviens, dit M. Bell dans sa conférence, d'une expérience faite alors avec ce téléphone, qui me remplit de joie. Un des deux appareils était placé à Boston dans une des salles des

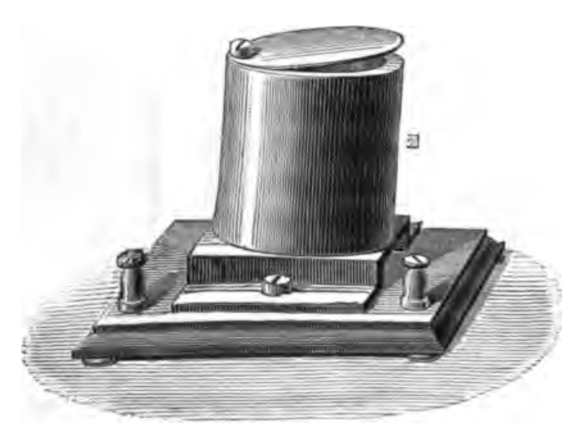


Fig. 87. — Récepteur du téléphone Bell à l'exposition de Philadelphie.

conférences de l'Université, l'autre dans le soubassement d'un bâtiment adjacent. Un de mes élèves observait ce dernier appareil, et je tenais l'autre. Après que j'eus prononcé ces mots : « *Comprenez-vous ce que je dis ?* » quelle a été ma joie quand je pus entendre moi-même cette réponse à travers l'instrument : « Oui, je vous comprends parfaitement. » Certainement l'articulation de la parole n'était pas alors parfaite, et il fallait l'extrême attention que je prêtais pour distinguer les mots de cette réponse ; cependant l'articulation de ces mots existait, et je pouvais croire que leur manque de clarté devait être rapporté uniquement à l'imperfection de l'instrument. »

Le grand défaut du récepteur était qu'il ne pouvait servir d'appareil transmetteur ; il fallait donc deux appareils à chaque station. Après une longue série d'expériences, M. Bell supprima la pile et employa pour noyau magnétique un aimant permanent.

C'est le premier téléphone magnétique représenté fig. 88 sous sa forme primitive : présenté à l'Institut d'Essex, à Salem, dans le Massachusetts, le 12 février 1877, il reproduisit devant un auditoire de 600 personnes un discours prononcé à Boston dans un appareil parfaitement identique.

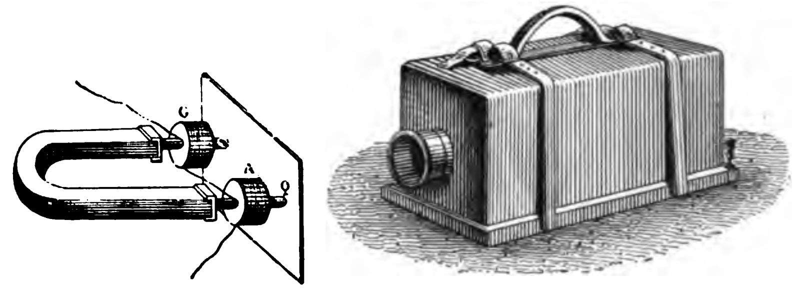


Fig. 88. — Téléphone de M. Bell, modèle avec transmetteur et récepteur identiques, Expérimenté à Salem le 12 février 1877.

Il n'y a plus qu'un pas à faire pour arriver au téléphone Bell tel que nous le connaissons sous sa forme pratique et portative.

Mais avant de le décrire et de passer en revue les différents téléphones au point de vue de leurs principes et de leur construction, nous devons dire quelques mots de la part qui revient à M. *Élisha Gray* dans l'invention du téléphone, et nous n'avons pas ici de meilleur guide que M. du Moncel, qui a suivi pas à pas les nombreux travaux qui ont déjà été faits sur la question.

Par une coïncidence remarquable, dont nous avons déjà eu un exemple à propos du principe des machines dynamo-électriques, le dépôt des brevets de M. Bell et de M. Gray a été effectué *le même jour*, le 14 février 1876, et tous deux signalaient l'importance et la nécessité des courants ondulatoires pour la transmission électrique de la parole ou des sons combinés.

Dans l'appareil breveté par M. Gray, les courants ondulatoires nécessaires à la transmission téléphonique étaient obtenus en faisant varier la résistance électrique du circuit, et par suite l'intensité du courant dans ce circuit.

Le transmetteur de M. Bell et celui de M. Gray sont identiques comme principe et analogues comme construction.

Nous reproduisons, figure 89, le diagramme du transmetteur de M. Bell, dans lequel un fil de platine attaché à une membrane tendue complétait le circuit voltaïque en plongeant dans de l'eau. Les vibrations de la membrane modifiaient la résistance du transmetteur et par suite l'intensité du courant. C'est le principe du téléphone *à pile* dont le téléphone à charbon d'Edison et le microphone sont des perfectionnements qui ont rendu pratique le téléphone à pile.

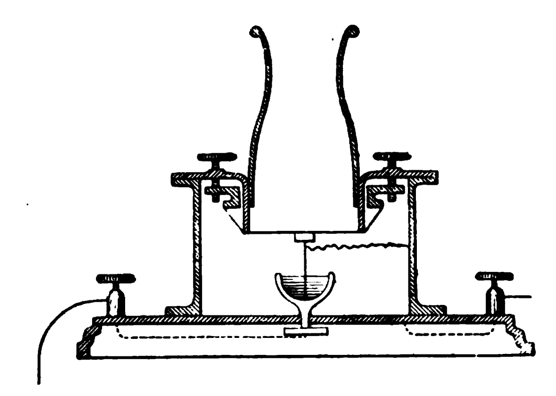


Fig. 89. — Premier modèle du transmetteur à liquide de M. Bell.

En réalité, le problème a été poursuivi et résolu par les deux inventeurs, mais par des procédés très différents; tandis que M. Gray s'est attaché à constituer un téléphone à pile et un transmetteur à liquide, M. Bell a construit, le premier, un téléphone magnétique, sans pile. Il mérite bien réellement le titre d'*inventeur du téléphone*, titre qui ne lui est d'ailleurs plus contesté, car le procès pendant entre MM. Gray et Bell s'est arrangé à l'amiable.

Classification des téléphones. — Le nombre des télépho-

nes de différents systèmes augmente chaque jour, mais, malgré l'infinie variété de ces appareils, on peut les diviser en deux classes bien distinctes :

1° Les téléphones sans pile ou téléphones magnétiques ;

2° Les téléphones à piles.

C'est dans cette dernière classe que viennent se ranger les transmetteurs à charbon et les microphones.

TÉLÉPHONES MAGNÉTIQUES.

Dans un appareil téléphonique, quel qu'il soit, on trouve toujours deux parties bien distinctes :

1° Le *transmetteur*, appareil qui transforme les paroles émises devant lui en courants ondulatoires envoyés dans la ligne ;

2° Le *récepteur*, qui, comme son nom l'indique, reçoit les courants ondulatoires et les transforme de nouveau en vibrations sonores.

Le premier fait qui caractérise les téléphones magnétiques consiste en ce que les deux parties, transmetteur et récepteur, sont *absolument identiques*, et peuvent jouer alternativement les deux rôles aussi facilement. Il résulte de ce fait qu'un système de téléphone magnétique complet se réduit à deux appareils, tandis que les téléphones à piles, dont nous parlerons plus loin, en emploient quatre, deux pour chaque poste.

Le premier et le plus simple de tous les téléphones magnétiques est le téléphone de M. Bell dont nous avons déjà vu les transformations successives au début de ce chapitre.

Téléphone de M. Bell. — Le téléphone de M. Bell (fig. 90), sous la dernière forme que lui a donné l'inventeur, se compose d'une petite boîte en bois ou en ébonite munie d'un manche qui renferme l'aimant placé en regard de la plaque vibrante et qui forme en même temps la poignée de l'instrument. Une vis placée à l'extrémité de ce manche sert à rapprocher ou à éloigner l'aimant de la plaque vibrante, ce qui constitue le *réglage* de l'instrument.

A l'extrémité du barreau se trouve la bobine dont la grosseur de fil et le nombre des spires doivent être proportionnés à la longueur de la ligne pour produire les meilleurs effets.

La plaque vibrante, qui n'a pas plus de 5 centimètres de diamètre dans sa partie libre et une épaisseur de un à deux dixièmes de millimètre, est découpée dans une feuille de tôle et recouverte de vernis ou d'étain pour en prévenir l'oxydation. Elle est maintenue sur la boîte par sa circonférence : à cet effet la boîte se compose de deux parties que l'on maintient, soit par des vis, soit par un pas de vis qui permet de fixer l'embouchure en forme d'entonnoir très évasé sur la boîte en pinçant directement la lame entre les deux parties.

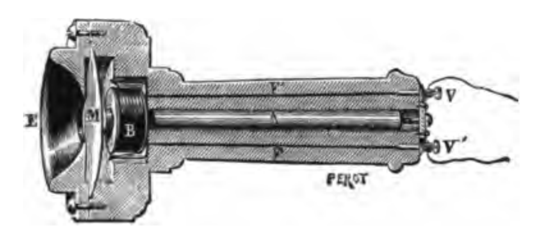


Fig. 90. — Téléphone Bell. Modèle à main ordinaire.

Le fonctionnement de l'appareil est bien connu : nous le rappellerons en quelques mots. En parlant devant l'embouchure d'un téléphone, la plaque vibre ; par ses mouvements, elle modifie la répartition du magnétisme dans le barreau aimanté, et par suite fait naître des courants induits dans la bobine placée à son extrémité. Le téléphone est donc bien un *générateur d'électricité*, générateur d'une délicatesse merveilleuse, modulant l'intensité des courants qu'il engendre pour leur faire suivre toutes les ondulations si variables et si compliquées qui caractérisent les sons articulés. Ces courants ondulatoires, ainsi développés dans un premier téléphone par les vibrations de la plaque, arrivent par deux conducteurs à un second téléphone qui les transforme de nouveau en vibrations sonores.

Pour une première explication, — inexacte en ce sens qu'elle

est incomplète, mais que nous compléterons ultérieurement, — nous pouvons admettre que les courants ondulatoires, c'est-à-dire de sens alternativement renversés, arrivent dans le téléphone récepteur, augmentent le magnétisme du barreau s'ils circulent dans les bobines dans un sens favorable à l'aimantation, le diminuent s'ils sont en sens inverse ; la plaque obéit à ces changements d'aimantation, se rapproche quand le magnétisme augmente, s'éloigne davantage par son élasticité propre quand le magnétisme diminue, et, par cette action, ondulatoire comme les courants qui la provoquent, vibre à l'unisson de la plaque du téléphone transmetteur, bien qu'avec des déplacements infiniment plus petits.

Les transformations successives qui s'effectuent dans l'intervalle du temps inappréciable qui sépare l'instant où la vibration sort de la gorge de l'interlocuteur, de celui où elle vient frapper l'oreille de l'auditeur, sont intéressantes à énumérer.

Elles sont au nombre de sept :

1° La vibration de l'air met la plaque du transmetteur en mouvement. — 2° Ce mouvement change la répartition magnétique du barreau aimanté. — 3° Ce changement dans la répartition magnétique développe des courants induits dans la bobine du transmetteur. — 4° Ces courants induits traversent la ligne et la bobine du téléphone récepteur. — 5° Ces courants provoquent des changements dans le magnétisme du barreau aimanté du récepteur. 6° Ces changements de magnétisme agissent sur la plaque et la font vibrer. 7° Les vibrations de la plaque se communiquent à l'air et viennent frapper le tympan de l'oreille de l'auditeur.

N'y a-t-il pas là une des plus belles preuves de l'équilibre et de l'unité des forces de la nature, équilibre si bien établi que l'on ne peut produire un changement, si faible qu'il soit, dans l'une d'elles, sans provoquer aussitôt des changements correspondants dans toutes les autres. L'effort développé par l'émission d'une vibration sonore est bien petit, et cependant le téléphone en représente l'écho à 300, 400 kilomètres de distance !

On a greffé sur le téléphone de M. Bell une foule d'appareils

qui ne sont le plus souvent que des modifications sans valeur comme sans importance. Nous ne pouvons examiner tous ces appareils, — déjà au nombre d'une centaine ; — nous nous contenterons seulement de décrire quelques modifications qui ont donné en pratique des résultats supérieurs à la disposition primitivement adoptée par l'inventeur, et qui ont permis d'entendre la parole d'une façon plus distincte et plus puissante, en se plaçant, dans certains cas, à une certaine distance de l'appareil récepteur. Ne perdons pas de vue cependant que les téléphones magnétiques que nous allons décrire ne constituent en aucune façon une découverte ou une invention nouvelle, mais simplement un *perfectionnement* dont nous aurons, dans chaque cas, à apprécier l'importance et la valeur.

Téléphone de M. Gower. — Le téléphone de M. Gower



Fig. 91. — Téléphone de M. Gower.

constitue un sérieux perfectionnement apporté au téléphone de M. Bell, car il a permis de faire parler le récepteur assez haut pour être entendu dans toute une salle. Rappelons cependant que M. Bell avait obtenu en partie ce résultat dans la mémorable expérience de Salem.

Dans l'appareil de M. Gower représenté figure 91, l'aimant NOS agit par ses deux pôles. Chacun d'eux supporte une petite pièce de fer oblongue sur laquelle est fixée la bobine. Le tout est enfermé dans une boîte plate en laiton, dont le couver-

cle porte la membrane vibrante dont l'épaisseur est un peu plus grande que celle des appareils construits jusqu'ici : elle est maintenue sur le couvercle par une couronne et quelques vis réparties sur la circonférence.

M. Gower emploie, au lieu de l'embouchure téléphonique ordinaire, des tuyaux acoustiques souples comme ceux des porte-voix.

Pour l'avertissement, M. Gower se sert d'un tube recourbé à angle droit, ouvrant par un bout sur le dessus de la membrane et par l'autre dans la boîte ; ce tube contient une anche vibrante. En soufflant dans le tuyau acoustique, l'anche vibre, et par communication solide fait vibrer la plaque du téléphone plus qu'on ne pourrait le faire en criant dans l'embouchure. Ces vibrations intenses produisent des courants induits puissants qui se traduisent dans le récepteur par des vibrations correspondantes, et par suite font entendre un bruit assez fort.

Le timbre particulier du son contribue d'ailleurs à le rendre facilement perceptible au milieu d'un certain bruit ambiant.

En munissant l'appareil d'un grand cornet résonnateur, on peut entendre la parole à distance. L'addition sur la membrane du tube A contenant l'anche vibrante ne trouble en aucune façon la netteté de la transmission.

Téléphones récepteurs. — La plupart des téléphones que nous allons maintenant décrire peuvent fonctionner comme transmetteurs, mais le plus souvent on s'en sert seulement comme *récepteurs* avec les transmetteurs à pile dont nous parlerons plus loin. En les décrivant ici à leur place logique, nous n'aurons qu'à les citer ensuite en décrivant les transmetteurs avec lesquels ils sont le plus souvent associés.

Téléphone récepteur de M. C. Ader. — Le récepteur de M. Ader (fig. 92), est un téléphone magnéto-électrique, dont l'aimant est recourbé en forme de cercle et sert en même temps de poignée à l'instrument. On voit sur la coupe (fig. 92) l'aimant A, les deux noyaux B B fixés aux deux pôles et sur lesquels sont roulées deux bobines. Jusqu'ici ce ré-

cepteur est analogue au téléphone Gower. M. Ader a ajouté à ce téléphone un anneau en fer doux F placé en avant de la plaque vibrante, auquel il a donné le nom de *surexcitateur*. Le diamètre de cet anneau est tel que les parties diamétralement opposées soient en regard des noyaux B B. La présence de ce surexcitateur a pour effet de modifier la nature du fantôme magnétique et de donner aux lignes de force une direction

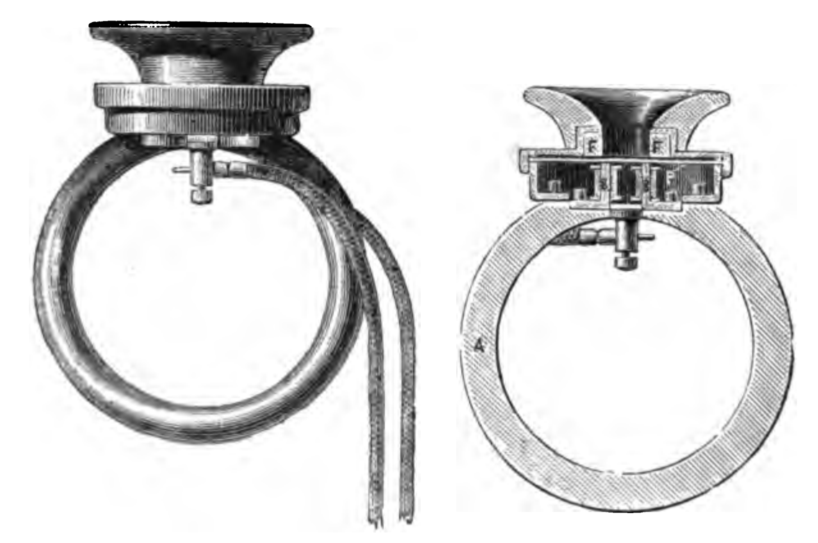


Fig. 92. — Élévation et coupe longitudinale du téléphone Ader.

perpendiculaire au plan de la plaque au lieu de leur laisser une direction *divergente*. Il en résulte que les variations produites dans le magnétisme de l'aimant par les courants d'induction qui traversent les bobines ont une action *maximum* sur la plaque vibrante dont le centre est placé dans le champ magnétique perpendiculairement aux lignes de force. Le téléphone est donc ainsi plus puissant et plus sensible aux nuances si délicates des ondulations qui constituent le timbre de la voix humaine.

Crown-téléphone. — Dans ce modèle de téléphone, le barreau droit du téléphone de Bell est remplacé par six aimants recourbés en anneau et disposés de telle sorte que les pôles

nord, par exemple, correspondent au noyau et les autres pôles touchent le bord extérieur du diaphragme (fig. 93). Par ce moyen, on renforce considérablement le champ magnétique et



Fig. 93. — Crown-téléphone de M. Phelps.

l'instrument est très puissant. Cette disposition est due à un Américain, M. *Phelps*. Son nom lui vient de sa forme même qui lui donne l'aspect d'une couronne.

Pony-Crown-téléphone. — Ce modèle, dû aussi à M. Phelps, n'est autre chose qu'un téléphone de Bell dont l'aimant est recourbé en forme de cercle (fig. 94). On y retrouve l'embouchure en ébonite E, la plaque P, un petit cylindre de fer doux G fixé sur l'aimant et formant le noyau de la bobine B.

Cet appareil ne présente rien de spécial que sa forme très commode qui permet de l'appliquer à l'oreille ou de le suspendre très facilement lorsqu'il n'est pas en service. C'est le modèle le plus employé dans les communications téléphoniques par le système Edison.

Téléphone électro-dynamique de M. Siemens. — Dans ce téléphone, la bobine est mobile, elle est collée sur une membrane et se meut dans le champ magnétique formé par un puissant électro-aimant alimenté par une source extérieure. Les cou-

rants d'induction prennent naissance par les déplacements de la bobine dans le champ magnétique, l'action est due à une induction électro-dynamique et non pas à un changement de magnétisme d'un barreau aimanté. Le récepteur est identique au transmetteur.

Différents modèles du téléphone Bell. — Nous ne pouvons que citer ici une foule de modifications du téléphone Bell, modifications effectuées dans le but d'augmenter l'intensité des sons émis par le récepteur, mais dont les résultats n'ont pas toujours été conformes aux espérances des innovateurs.

Dès le mois d'octobre 1877, un Anglais, M. *Wilmot*, essaya

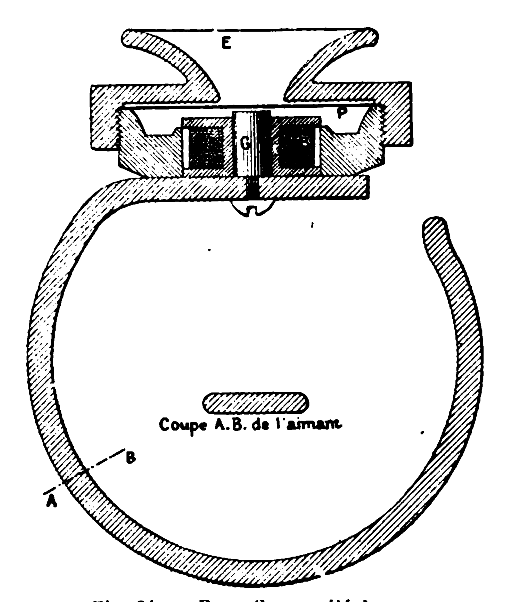


Fig. 94. — Pony-Crown téléphone.

d'augmenter le nombre des diaphragmes des hélices et des aimants pour augmenter l'énergie des courants développés sous l'influence de la voix. Vers la même époque, M. *Trouvé* contruisit aussi un téléphone à *diaphragmes multiples*, mais ces appareils ne donnèrent pas de bons résultats.

En Amérique, MM. *Phelps* et *Elisha Gray* construisirent des

appareils à plusieurs diaphragmes, ainsi que M. *Cox Walker*, en Angleterre ; ces appareils donnèrent de meilleurs résultats que ceux de MM. Wilmot et Trouvé, et on en trouvera la description dans l'ouvrage de M. le comte du Moncel sur le *Téléphone;* mais en pratique on a renoncé à ces appareils compliqués qui demandent un réglage spécial pour chaque membrane et l'on emploie exclusivement des téléphones à un seul diaphragme.

Le *téléphone-tabatière* n'est autre chose qu'un téléphone Bell dans lequel l'aimant est roulé en spirale, faisant un tour sur lui-même, ce qui le rend peu volumineux et très portatif.

En adaptant sur le côté de cette boîte un manche en bois de quelques centimètres, l'appareil se transforme en *téléphone-miroir*, etc.

TÉLÉPHONES A PILE.

Dans les téléphones magnétiques, le parleur agit comme un véritable générateur d'électricité : c'est le travail mécanique de la voix dont une partie se transforme en courants d'induction qui, envoyés dans le récepteur, le font vibrer synchroniquement avec la membrane du parleur. Il résulte de ce fait que les courants envoyés dans la ligne ont une intensité limitée, et que, dans aucun cas, le récepteur ne pourra émettre de sons plus puissants que ceux émis devant le parleur.

Il n'en est pas de même dans les téléphones à pile. Dans ces appareils, les vibrations du transmetteur ne sont plus utilisées à *produire* des courants électriques, mais à *distribuer* convenablement ceux venant d'une source constante : leur puissance n'est donc limitée que par celle de la source employée. Dans ces conditions, la puissance du récepteur peut être très grande, et, dans de certaines conditions, dépasser même celle des sons émis devant le transmetteur. Le microphone nous en offrira une foule d'exemples.

Tous les transmetteurs des téléphones à pile sont fondés sur le même principe : utiliser les vibrations d'une *plaque* ou d'une

pièce quelconque pour faire varier la résistance électrique d'un circuit et, par suite, modifier dans un certain rapport l'intensité du courant électrique qui le traverse.

Ce principe général suppose donc que le transmetteur est composé d'une matière spéciale, à résistance variable, disposée plus ou moins ingénieusement dans le circuit et modifiant sa résistance sous l'influence des vibrations que ce transmetteur reçoit. Il en résulte une classification très simple des transmetteurs à pile, dépendant de la nature de la substance qui intervient pour constituer la résistance variable.

On distingue trois classes de transmetteurs téléphones à pile :

1° Les *transmetteurs à liquides*, dans lesquels on fait usage d'un liquide pour constituer la résistance variable ;

2° Les *transmetteurs à arc voltaïque*, dans lesquels on emploie une mince couche d'air et des courants de haute tension ;

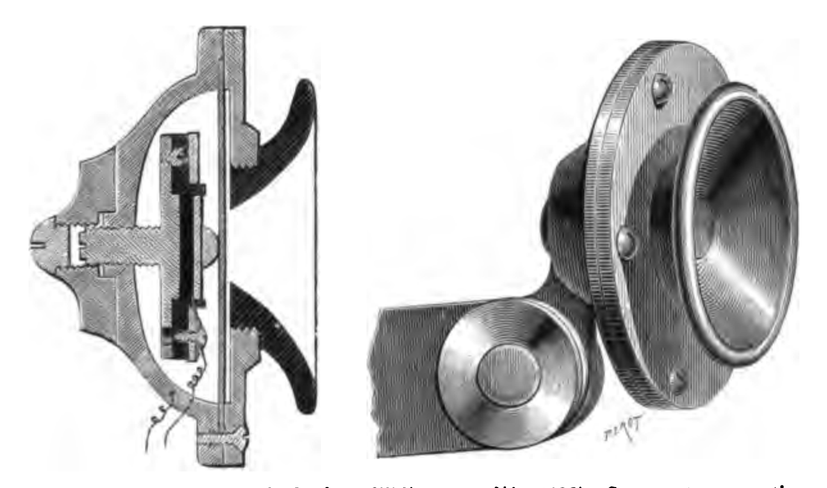


Fig. 95. — Transmetteur à charbon d'Edison (modèle 1879). Coupe et perspective.

3° Les *transmetteurs à charbon* ou plus généralement *à matières solides*, les seuls importants et pratiques, parmi lesquels viennent se ranger les transmetteurs microphoniques ou *microphones*.

Nous ne dirons que quelques mots des deux premières classes

qui n'ont pas donné de résultats importants dans la pratique, réservant une plus large place aux transmetteurs à charbon qui sont aujourd'hui exclusivement employés.

Transmetteurs à liquides. — Les transmetteurs à liquides sont, au point de vue historique, les plus anciens téléphones articulés. Nous avons vu que, dès l'année 1876, MM. *Bell* et *Gray* avaient imaginé un appareil reproduisant la parole en faisant varier la résistance d'une couche liquide placée entre deux pointes de platine. C'est ce qu'avait fait aussi très grossièrement et sans succès M. *Yeates*, de Dublin, dès 1865, en voulant perfectionner le téléphone musical de *Reiss*.

Aux États-Unis, M. *Richemond* a breveté dès 1877 un téléphone à liquide analogue à celui de M. Bell (page 223) et auquel il a donné le nom d'*électro-hydro-téléphone*.

Le 18 février 1878, M. *Salet* a présenté à l'Académie des sciences un téléphone à transmetteur à liquide dans lequel un petit levier d'aluminium en communication avec la pile était fixé à la plaque vibrante et portait à son extrémité une petite lame de platine; à une très faible distance de celle-ci s'en trouvait une seconde en relation avec la ligne. Une couche liquide se trouvait interposée entre les deux plaques.

Les vibrations de la membrane déterminent, dans l'épaisseur de la couche liquide traversée par le courant, et par suite dans l'intensité de celui-ci, des variations, lesquelles en occasionnent de semblables dans la force attractive du récepteur.

MM. *J. Luvini* et *Carlo Resio*, de Gênes, ont imaginé aussi des téléphones analogues comme principe.

Tous ces appareils n'ont qu'un intérêt purement scientifique et ne sont pas employés dans la pratique.

Transmetteurs à arc voltaïque. — Ces téléphones ont été imaginés dans le but d'obtenir des variations de résistance plus grandes qu'avec les liquides pour une même amplitude de vibration du diaphragme, mais l'emploi de grandes résistances telles que celles des conducteurs gazeux impose aussi l'emploi de courants de haute tension.

M. *Trouvé*, qui a combiné le premier téléphone de ce genre, conseille l'emploi de ses éléments à rondelles humectées de sulfate de cuivre et de sulfate de zinc ; il en dispose quatre ou cinq cents en série pour obtenir une tension suffisante.

Ces appareils, comme les transmetteurs à liquides, sont restés sans applications.

TRANSMETTEURS A CHARBON ET MICROPHONES.

L'invention du premier *transmetteur à charbon* est due à *Edison* qui le construisit dès l'année 1876, tout au commencement de la découverte de Graham Bell. Le premier *microphone*, de date plus récente, est dû à M. *Hughes*, l'inventeur du télégraphe imprimeur, qui l'a montré pour la première fois en janvier 1878 aux fonctionnaires de la *Submarine Telegraph Company*.

Le principe que MM. Edison et Hughes ont appliqué les premiers à la transmission électrique des vibrations sonores, — nous prenons à dessein ce mot vague et général, — a été découvert, en 1856, par M. le comte du Moncel.

A la suite de nombreuses recherches sur les interrupteurs électriques, M. du Moncel a constaté que la *pression exercée au point de contact entre deux corps conducteurs appuyés l'un sur l'autre pouvait influer considérablement sur l'intensité électrique développée*.

Cette variation au point de contact est d'autant plus grande que les conducteurs présentent plus de résistance, qu'ils sont plus ou moins durs et qu'ils sont plus ou moins bien décapés. Le principe découvert par M. du Moncel fut appliqué en 1865 par M. *Clérac*, fonctionnaire des lignes télégraphiques, à un rhéostat à charbon formé d'un tube rempli de plombagine dans lequel un disque mobile, formant électrode, pouvait, en pressant plus ou moins la plombagine, faire varier, dans un rapport assez grand, la résistance de cette substance.

Téléphone à charbon d'Edison. — Le transmetteur à

charbon d'Edison a reçu un grand nombre de formes depuis le premier appareil construit en 1876.

Il (fig. 95) se compose actuellement d'une embouchure en ébonite, d'une lame vibrante et d'un disque de charbon préparé, de la grandeur d'une pièce d'un franc, placé sur un support qu'on peut à volonté écarter ou rapprocher de la plaque vibrante à l'aide d'une vis disposée sur la face postérieure du parleur. Une petite plaque de platine surmontée d'un bouton en ivoire, en forme de goutte de suif, vient s'appliquer sur la face supérieure de la pastille de charbon.

Les vibrations de la plaque se transmettent à la pastille par la petite plaque de platine, les variations de pression produites par les vibrations font varier la résistance électrique de cette pastille de charbon intercalée dans le circuit d'une pile et d'un récepteur (téléphone magnétique de Bell, Phelps, Ader, etc.), et le font vibrer synchroniquement. En pratique cependant, le courant de la pile transformé par le parleur en courant ondulatoire n'est pas envoyé *directement* dans le récepteur, mais il est localisé, traverse le fil inducteur d'une petite bobine d'induction, et c'est le fil *induit* qui est en communication avec le téléphone récepteur du poste opposé. Avant d'aller plus loin, nous devons faire connaître les raisons de cette disposition spéciale.

Emploi des courants induits dans les téléphones à pile. — Le rôle du transmetteur dans les téléphones à pile se réduit, comme nous l'avons vu, à faire varier la résistance électrique du circuit, variation qui se traduit aussitôt par une variation proportionnée, et en sens inverse, dans l'intensité du courant qui le traverse.

Pour une vibration donnée, le changement dans la résistance du circuit aura une valeur fixe donnée, que nous supposerons être de *un ohm* pour fixer les idées. Si le circuit total a une faible résistance, *dix ohms* par exemple, la variation de *un ohm* produite dans le transmetteur fera varier l'intensité de *un dixième* de sa valeur totale, et par suite le téléphone récepteur, qui agit sous l'influence des variations d'intensité, vibrera énergiquement et

parlera avec une certaine puissance. Si, au contraire, la résistance totale du circuit est grande, mille *ohms* par exemple, les variations d'intensité ne seront plus que de un millième de l'intensité totale, intensité que l'allongement de la ligne aura elle-même affaiblie dans une grande proportion.

Il faudrait donc, pour obtenir un effet aussi puissant que dans le premier cas, augmenter le nombre des éléments de la pile ainsi que les variations de résistance, par la multiplication des disques de charbon, par exemple; mais leur nombre ne peut pas être augmenté indéfiniment, car ils introduisent dans le circuit leurs résistances propres qui viennent contrebalancer l'avantage résultant de contacts multiples. A un moment donné, il y a équilibre, et en augmentant leur nombre, l'effet est plus nuisible qu'utile.

La difficulté a été habilement vaincue par M. *Edison* en employant une disposition appliquée déjà en 1874 par M. *Elisha Gray* à son téléphone musical. Au lieu d'envoyer le courant du transmetteur directement sur la ligne, M. Edison lui fait traverser seulement le *gros fil* d'une bobine d'induction sans trembleur. Le fil fin ou fil induit correspond avec la terre par une de ses extrémités; la seconde est attachée à la ligne, traverse le téléphone du poste récepteur et va à la terre. Le transmetteur n'agit plus que sur une faible résistance, représentée seulement par la pile, le transmetteur et le fil inducteur : ses variations de résistance ont alors une assez grande valeur relative : elles se traduisent dans le fil inducteur par des variations correspondantes d'intensité et, dans le fil induit, par des courants d'induction d'une amplitude proportionnelle. Mais, d'autre part, comme nous l'avons vu à propos du rôle des bobines d'induction, les courants développés dans le fil induit acquièrent dans la bobine une grande tension qui leur permet de franchir de grandes résistances, et cette propriété a permis de *téléphoner* à des distances considérables avec le courant de trois piles Leclanché.

Voici maintenant comment fonctionne le téléphone Edison. Les courants d'intensité variable *modulés* par le transmetteur

traversent le fil inducteur, et eu égard à la faible résistance totale du circuit, font varier l'intensité entre des limites assez éloignées : ces courants ondulatoires influencent alors le récepteur comme dans le téléphone Bell.

La pastille de charbon qui constitue l'âme du transmetteur mérite une mention spéciale. Elle est fabriquée à l'aide du noir de fumée provenant de la combustion de lampes à pétrole à mèche trop longue dans un espace à peu près clos. On agglomère ensuite ce noir de fumée en le comprimant *légèrement* sous une presse à balancier. On en forme ainsi une pastille assez friable, mais d'une solidité suffisante lorsqu'elle est prise entre les deux plaques de platine qui la maintiennent, et d'une sensibilité extrême au point de vue de la variation de sa résistance électrique avec la pression.

Modifications diverses du téléphone à charbon. — Nous avons vu déjà que M. *Navez*, colonel d'artillerie belge, avait employé plusieurs disques de charbon.

Dans le téléphone de MM. *Pollard* et *Garnier*, le transmetteur se compose de deux pointes de mine de plomb, placées sur des porte-crayons métalliques, appliquées par le bout contre la lame vibrante avec une pression qui doit être réglée. Comme dans le téléphone d'Edison, c'est le courant induit provenant d'une petite bobine qui va au récepteur. M. *Bellesen* a combiné un téléphone à réaction dans lequel le transmetteur est formé par un crayon de charbon venant s'appliquer contre la plaque, et par un véritable électro-aimant creux dont le gros fil est traversé par le courant de la pile après avoir passé par le crayon de charbon et la plaque.

Le transmetteur de M. *Righi* se compose d'une plaque portant un disque plat venant exercer une pression variable sur de la poudre de plombagine mêlée à de la poudre d'argent placée dans une petite auge au-dessous du disque. Ce transmetteur ne peut fonctionner qu'*horizontalement*, ce qui est un inconvénient à son emploi. Le récepteur est un téléphone Bell de grandes dimensions dont la plaque vibrante est constituée par une feuille

de parchemin au centre de laquelle est fixé un petit disque de fer doux. Il n'est pas employé en pratique.

Électrophone de M. Ader. — Le transmetteur est constitué par une sorte de porte-crayon mobile en bois terminé par une soucoupe devant laquelle on parle. L'extrémité de ce porte-crayon se termine par un petit cylindre de charbon arrondi à son extrémité et qui appuie sur un second morceau de charbon fixe de plus grande section. Le courant traverse le charbon fixe, le petit crayon mobile et sort par un fil très fin et très élastique pour rejoindre la ligne. En maintenant l'appareil vertical, on rompt le circuit ; en l'agitant, on produit des chocs qui se traduisent sur le récepteur par des bruits intenses pouvant être entendus à une assez grande distance ; en tenant l'appareil un peu incliné, il y a un léger contact entre les deux charbons et la transmission téléphonique directe, sans bobine d'induction, s'effectue très nettement et avec une grande puissance.

Le récepteur est un tambour de basque de 15 à 18 centimètres de diamètre, tendu d'une feuille de parchemin, sur lequel sont fixées six petites armatures en fer-blanc très minces et très étroites disposées sur un cercle de 6 centimètres de diamètre.

En face de ces armatures sont placés six petits électro-aimants microscopiques, chacun d'eux pouvant être réglé séparément à l'aide d'une vis. Les six petits électro-aimants sont tous disposés en tension et agissent simultanément sur leurs armatures dans le même sens avec une très grande rapidité.

Avec ce récepteur, la parole peut être entendue à 5 ou 6 mètres de distance en employant le transmetteur que nous avons décrit, mais le réglage en est fort difficile, car la membrane est trop sensible à la chaleur et à l'humidité.

Transmetteur de M. Blake. — Ce système constitue un parleur assez puissant très employé aujourd'hui en Angleterre, avec les courants induits et le téléphone Bell comme récepteur. Le contact à résistance variable est constitué par deux organes mobiles indépendants du diaphragme et toujours en contact léger l'un avec l'autre. On remplace la rigidité d'une des parties

par son inertie en fixant le charbon sur une masse pesante, la seconde partie du contact est formée par un petit grain de platine pressé légèrement contre le charbon par un petit ressort. Le contact des deux pièces n'étant jamais rompu, il n'y a pas de crachements résultant de la rupture et du rétablissement brusques du circuit.

Microphone de M. Hughes. — Le *microphone* n'est autre chose qu'un transmetteur téléphonique de forme spéciale, mais il doit son nom, qui lui a été donné par M. Hughes, son inventeur, aux *résultats* qu'il permet d'obtenir.

Le microphone est en réalité un appareil *amplificateur* des vibrations mécaniques de faible intensité qu'il transforme en courants ondulatoires. Ces courants ondulatoires envoyés dans un téléphone récepteur produisent très souvent des vibrations

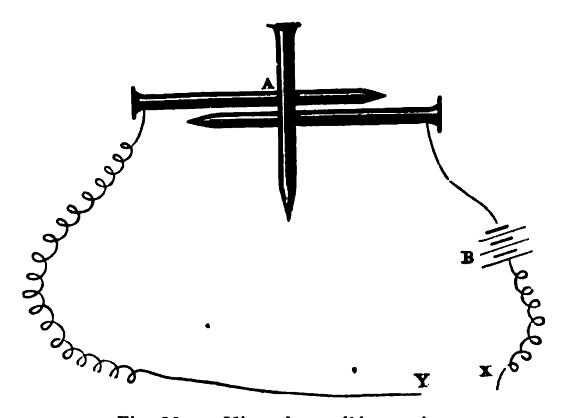


Fig. 96. — Microphone élémentaire.

sonores d'une intensité beaucoup plus grande que la cause qui leur a donné naissance. Il joue donc en acoustique, par rapport aux sons faibles, le rôle que le microscope joue en optique par rapport aux petits objets.

Il sera plus facile, après avoir décrit les appareils si simples de M. Hughes, d'expliquer comment ces résultats si incroyables et si imprévus peuvent être obtenus.

L'appareil le plus simple employé par M. Hughes dans ses

nombreuses recherches est représenté figure 96. Deux clous A sont fixés sur une planchette horizontale, à la distance d'environ un millimètre l'un de l'autre. Les fils X et Y fixés à ces clous conduisent à une pile B et à un téléphone, de sorte que l'intervalle des clous forme la seule interruption dans le circuit. En posant un troisième clou en travers des deux premiers, le courant passe

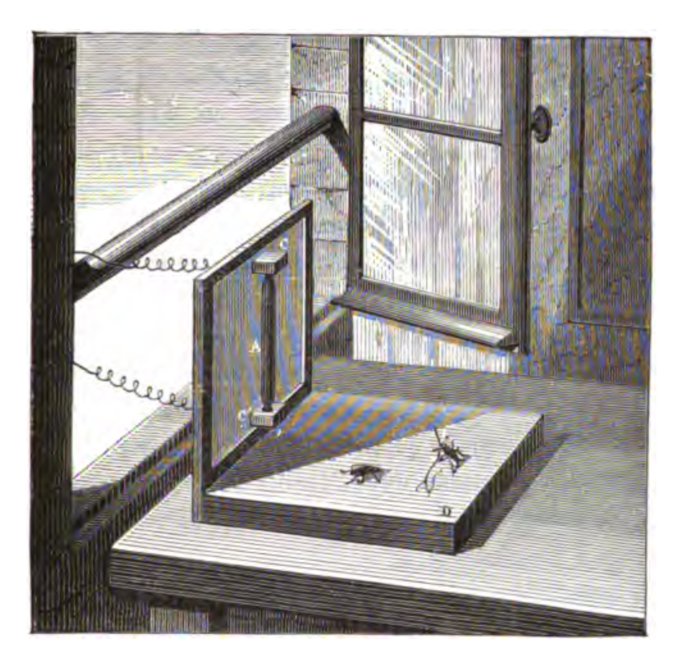


Fig. 97. — Microphone de M. Hughes. Audition à distance du bruit produit par la marche d'insectes.

par les points de contact des deux clous qui forment un contact imparfait auquel l'appareil doit toute sa sensibilité, et cet appareil constitue un transmetteur téléphonique parfait. Des paroles dites, des airs chantés à ce petit clou, qui peut danser sur les deux autres au son de l'articulation et de la note émises, sont instantanément transmis au récepteur, à l'autre extrémité de la ligne, avec une puissance et une netteté merveilleuses. L'effet produit est encore meilleur avec des baguettes de charbon.

Mais l'appareil le plus sensible que le professeur Hughes ait construit, et qui est resté, sauf des modifications peu importantes, le microphone *classique*, est représenté figure 97.

Il consiste en un petit crayon de charbon de cornue A terminé en pointe à chacune de ses extrémités : il est légèrement soutenu dans une position verticale entre deux godets creusés dans deux petits dés de charbon CC′, fixés contre une table mince d'harmonie posée sur un plateau solide D (fig. 97). Ces dés CC′ sont reliés à la pile et au fil de ligne qui conduit au téléphone. Cet instrument, dans sa grossière ébauche, est d'une surprenante et merveilleuse délicatesse.

Il convertit en bruits sonores, non seulement les notes de musique et les paroles, mais les vibrations les plus faibles et les bruits même imperceptibles. Le coup le plus léger, le moindre contact contre le plateau suffit pour produire dans le téléphone un grincement bruyant. La pointe d'un pinceau promenée sur le plateau, la chute d'une petite balle de coton, produisent un véritable vacarme dans le récepteur ; la promenade d'un insecte ou d'une mouche sur le plateau D est perçue avec une netteté parfaite par une personne dont l'oreille est placée contre le téléphone placé à distance et même à plusieurs kilomètres du transmetteur.

Effets produits dans le microphone. — Nous pouvons nous rendre compte maintenant des différences, assez légères du reste, qui caractérisent le transmetteur à charbon d'Edison, et le microphone sous la forme simple que lui a donnée M. Hughes.

Dans les deux appareils, l'action téléphonique ou microphonique est produite par des *variations de résistance électrique* résultant des vibrations communiquées au transmetteur.

Dans le téléphone à charbon d'Edison, ces vibrations agissent sur une plaque qui vient exercer des pressions variables sur un disque peu consistant ; dans le microphone de M. Hughes, les vibrations agissent pour changer les points et les surfaces de contact.

Il y avait donc lieu, *à l'origine*, de considérer les inventions

d'Edison et de M. Hughes comme deux inventions distinctes autant par les effets produits que par les procédés employés à les produire.

Une série d'appareils est venue, depuis, combler la ligne de démarcation qui séparait ces deux inventions au moment de la découverte de M. Hughes. Aujourd'hui la distinction n'est plus toujours facile à faire, l'on peut désigner sous le nom générique de *transmetteurs à charbon* tous les microphones et parleurs microphoniques dont on avait fait, dans le principe, deux classes distinctes.

On conçoit facilement comment le microphone de M. Hughes peut transmettre les bruits les plus faibles en les amplifiant si l'on examine ce qui se passe dans un *contact microphonique*. Prenons par exemple l'insecte marchant sur la planche du microphone (fig. 97).

Chaque pas effectué par l'animal produit un petit mouvement mécanique, qui n'est pas de nature à impressionner l'oreille, mais qui agit sur le contact microphonique, déplace, change les points de contact, ce qui se traduit par des variations d'intensité du courant. Ces petits déplacements mécaniques sont d'autant plus faciles à effectuer que le crayon de charbon est dans un équilibre plus instable, et, en pratique, il faut proportionner cette sensibilité à la nature des sons que l'on veut transmettre.

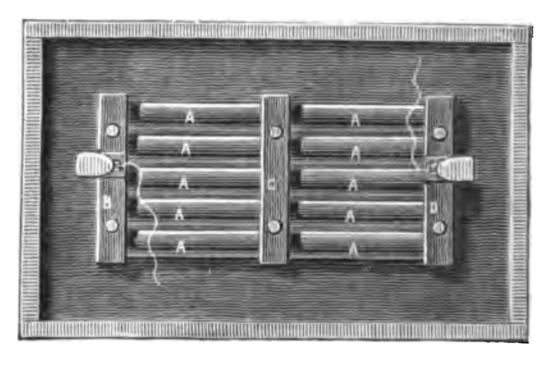
Depuis le transmetteur à charbon d'Edison et le microphone de M. Hughes, on a bien imaginé plus de deux cents dispositions de transmetteurs téléphoniques se rapprochant plus ou moins de ces inventions originales. Ne pouvant les décrire toutes, nous ne signalerons que les principales ; on verra par ces quelques exemples que leur nombre peut varier à l'infini.

Nous ne citons d'abord que pour mémoire les microphones de MM. *Ducretet*, *Trouvé*, *Varey*, etc. On y retrouve toujours le charbon vertical enchâssé dans deux petits cubes de charbon, comme dans l'appareil original de Hughes. On s'est ensuite attaché à la multiplicité des contacts pour augmenter la sensi-

bilité des transmetteurs, et les appareils que nous allons décrire maintenant sont ceux qui, jusqu'ici, ont donné les résultats les plus satisfaisants dans cette voie.

Le microphone de *Crossley*, très employé en Angleterre, se compose de quatre crayons de charbon disposés en losange sur une plaque vibrante horizontale devant laquelle on parle à une certaine distance. Il est employé à Paris concurremment avec le transmetteur Ader.

Transmetteur de M. C. Ader. — Ce microphone est aujourd'hui de beaucoup le plus employé en France. C'est celui qui a fonctionné à l'Exposition pour les auditions théâtrales télé-



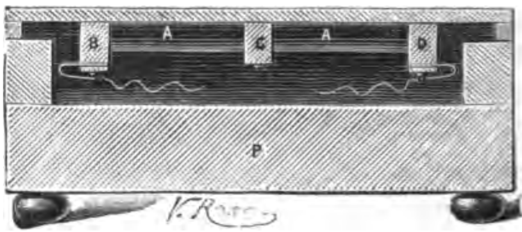


Fig. 98. — Vue en dessous et coupe longitudinale du transmetteur de M. Ader disposé sur un socle en plomb pour les auditions téléphoniques théâtrales.

phoniques, et qui tend à remplacer les transmetteurs à charbon d'Edison sur le réseau de la Société générale des téléphones. La fig. 98 le représente en coupe longitudinale et en vue en des sous.

Il se compose de dix petits crayons de charbon AA disposés en deux séries de cinq et s'appuyant par leurs extrémités sur trois traverses BCD en charbon fixées sur une petite planchette en sapin qui reçoit les vibrations et sert en même temps de couvercle à l'appareil. Il est assujetti sur un socle en plomb P supporté par quatre pieds en caoutchouc, afin d'empêcher les trépidations du plancher de la scène d'arriver jusqu'au transmetteur.

Cette précaution est essentielle, surtout à l'Opéra où, pendant la danse, le plancher fortement ébranlé produirait dans le système des crachements fort désagréables. Grâce à la disposition imaginée par M. C. Ader, les secousses s'emmagasinent dans les pieds en caoutchouc et, à cause de l'inertie de la masse de plomb, ils ne parviennent pas au transmetteur qui n'est alors influencé que par les ondes sonores de l'air. (Voy. page 280.)

Transmetteur microphonique de MM. Paul Bert et d'Arsonval. — Dans ce transmetteur tous les contacts sont montés en *quantité*. Chaque contact se fait séparément avec une grande légèreté qui assure la sensibilité, le courant se divise entre tous les contacts qui constituent autant de microphones séparés et diminuent la résistance proportionnellement à leur nombre. MM. Paul Bert et d'Arsonval ont construit plusieurs modèles de ces microphones. Dans les uns, le réglage s'effectue par la poussée d'un liquide, le mercure, comme dans le téléphone Hopkins à un seul contact (1); dans d'autres, on emploie des ressorts, ou les attractions magnétiques qui constituent un ressort sans poids, dans d'autres enfin la pesanteur. La figure 99 représente ce dernier système. Il se compose d'une caisse de résonnance semblable à celle des instruments à corde ou d'une simple planchette légère d'ébonite ou de sapin qui porte la série des contacts.

Ces contacts consistent en une série de petits cylindres nickelés qui, enfilés sur un axe commun métallique, pendent vertica-

(1) Voir 1re édition, page 263.

lement sur une des faces de la boîte. Leur mouvement est indépendant, et chacun d'eux vient s'appuyer sur une baguette transversale de charbon à lumière servant de collecteur et qui reçoit les vibrations de la caisse de résonnance ou de la planchette. La pression de ces crayons sur le collecteur est plus ou



Fig. 99. — Microphone de MM. Paul Bert et d'Arsonval.
Charbons C, enfermés dans des tubes nickelés. Les vibrations de la parole sont transmises au centre par un tube muni d'un pavillon. — Sur une boite de résonnance sont enfilés les crayons métalliques C qui reposent sur le charbon B. Le courant entre par A, traverse C, où il se divise, et ressort en A.

moins forte, suivant l'inclinaison qu'on donne à la caisse, qui peut être montée sur un pied à charnière, ou suspendue dans une salle par les deux fils qui lui portent le courant. Le courant arrive par l'axe supérieur, se divise entre les crayons et sort par le collecteur. Le nombre des contacts peut être aussi grand qu'on le désire, ainsi que les dimensions de la caisse.

Microphone de M. Boudet, de Paris. — Dans ce système les contacts sont montés en tension, au lieu d'être établis en *dérivation* comme dans l'appareil précédent. Ce transmetteur représenté figure 100 se compose d'une embouchure E fixée à l'extrémité d'un tube de verre T d'un centimètre de diamètre, fixé lui-même sur un pied à genou, ce qui permet de faire prendre à l'ensemble de l'appareil toutes les inclinaisons.

L'embouchure porte une plaque d'ébonite de 1 millimètre d'épaisseur, sur laquelle est fixée une masse de cuivre M^1 qui pénètre un peu dans le tube de verre. Dans ce tube, se trouvent six boules de charbon de cornue d'un diamètre un peu plus petit, de façon à pouvoir s'y mouvoir très librement.

Le microphone est complété par une seconde masse de suivre M^2 s'appuyant sur le fond d'une culasse creuse K, par l'intermédiaire d'un petit ressort en spirale non représenté sur la figure. La vis V fixée sur l'étrier Q sert à régler la pression de la masse M^2 contre les boules. Les variations de résistance du microphone se produisent également sur tous les contacts des boules, parce que, en parlant devant l'embouchure, les vibrations se transmettent presque instantanément, comme dans l'expérience bien connue des billes de billard.

Transmetteurs divers. — Nous devons arrêter là notre description de transmetteurs microphoniques; pour être complète, elle exigerait un volume. Les modifications apportées aux appareils ont d'ailleurs porté sur tous les points.

Pour concentrer les vibrations, M. *Maiche* emploie une sorte de grande cloche en verre, un globe de pendule, couché sur le côté. On parle devant l'ouverture et les vibrations se transmettent à un contact microphonique reposant sur la partie supérieure.

Dans le *pantéléphone* (?) de M. *Locht-Labye*, la parole met en vibration une plaque de liège suspendue à deux ressorts très légers; le contact microphonique est formé par une pastille de charbon collée sur cette plaque et un butoir fixe en cuivre ou en platine contre lequel elle vient s'appliquer.

On a essayé aussi de remplacer le charbon par d'autres subs-

tances. M. *C. Herz* a étudié dans ce but des métaux réduits en poudre et agglomérés, par un moyen chimique, avec une sorte de ciment non conducteur. Les résultats ne paraissent pas avoir été meilleurs ni moins bons qu'avec le charbon.

Nous avons vu jusqu'ici deux modes de montage des transmetteurs microphoniques; la première consiste à placer le transmetteur dans le même circuit que la pile, la ligne et le récep-

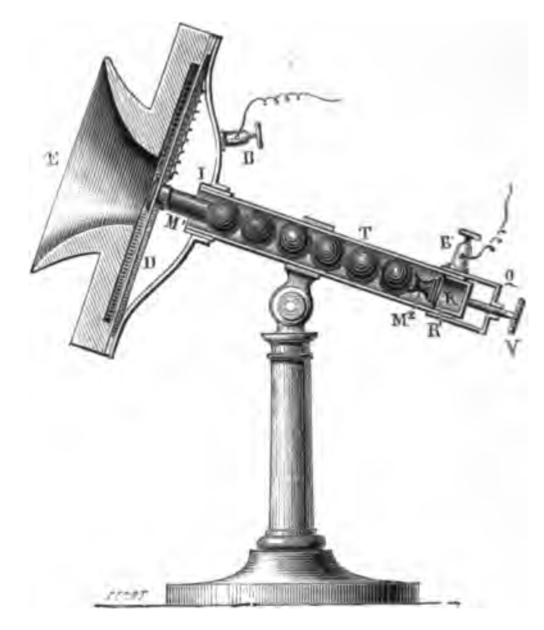


Fig. 100. — Microphone de M. le Dr Boudet, de Paris.

teur; le second consiste à faire traverser le courant de la pile au fil inducteur d'une bobine d'induction et de mettre la ligne en relation avec le fil induit,

M. *C. Herz* a étudié un troisième mode de montage qui paraît lui avoir donné de bons résultats. Ce montage consiste à disposer le transmetteur et la ligne *en dérivation* sur la source électrique. D'après les lois des courants dérivés, on sait que le courant se partage en raison inverse des résistances qu'il rencontre;

en faisant varier la résistance de la dérivation sur laquelle est établi le transmetteur, on modifie donc le courant qui traverse la ligne et le récepteur.

Le montage en circuit simple, c'est-à-dire celui qui consiste à disposer le microphone, la pile, le récepteur et la ligne à la suite les uns des autres sur un même fil, ne convient que pour les lignes très courtes et les expériences de laboratoire ; pour les lignes un peu longues, l'expérience décidera du choix à faire entre le système à bobine d'induction et le système à dérivation.

Il est très difficile de formuler une opinion relativement à la valeur des transmetteurs microphoniques que nous venons de décrire. Chacun a des qualités spéciales qui en recommandent l'emploi suivant les applications qu'on a en vue, aussi ne faut-il pas s'étonner de voir chaque inventeur prétendre, — avec raison, — que son appareil est *le meilleur*. Chacun d'eux est en réalité le meilleur lorsqu'on l'applique dans les conditions les plus favorables à son bon fonctionnement.

Avant de passer en revue les différentes applications du téléphone, nous allons examiner, sous le titre de *téléphones spéciaux*, une série d'appareils dans lesquels les actions téléphoniques sont produites par des phénomènes d'un ordre tout différent de celles que nous avons examinées jusqu'ici. Cet examen nous permettra d'établir une théorie plus complète des actions multiples qui sont en jeu dans les transmissions téléphoniques, et de bien définir le rôle de chacun des organes qui constituent ces merveilleux instruments.

CHAPITRE III

TELÉPHONES SPÉCIAUX

Dans tous les téléphones décrits jusqu'à présent, nous trouvons toujours un transmetteur magnétique, à charbon ou microphonique, envoyant dans la ligne un courant *ondulatoire*, et ce courant ondulatoire agissant sur un téléphone récepteur dans lequel nous retrouvons toujours, comme parties essentielles : 1° une plaque vibrante ; 2° un noyau aimanté et quelquefois un électro-aimant ; 3° une bobine.

Aucun de ces organes n'est *indispensable* à la réception des sons articulés dans le téléphone ; certains appareils récepteurs n'emploient même *aucun* de ces trois organes.

Les principes sur lesquels s'appuient les récepteurs sont aussi souvent fondés sur des actions très différentes des actions magnétiques : tantôt ce sont des actions physiologiques, comme dans le récepteur de Gray, tantôt des actions chimiques, comme dans l'électro-motograph d'Edison, etc., etc. Nous examinerons les plus importants et les plus originaux de ces appareils.

Téléphones sans plaque vibrante. — La première simplification que peut recevoir le téléphone de Bell consiste dans la suppression de la plaque vibrante. Pour obtenir des effets distincts, il faut employer un transmetteur à charbon et les courants induits. La parole est cependant très faible, et M. du Moncel a constaté que l'effet est d'autant plus caractérisé que le noyau est

plus fortement aimanté et que sa masse est plus petite. En employant un ressort de montre bien aimanté et une petite bobine de fil fin à son extrémité, M. du Moncel a pu entendre la parole en employant un téléphone magnétique de Bell.

A côté de ces téléphones sans diaphragme, il convient de placer les expériences de M. *Breguet* dans lesquelles il a augmenté l'épaisseur du diaphragme jusqu'à *quinze* centimètres sans enlever au téléphone sa puissance et ses facultés d'articulation. Dans l'un il n'y a pas de plaque, dans l'autre il y en a trop, et le téléphone articule dans un cas comme dans l'autre.

Le rôle du diaphragme dans le téléphone *récepteur* n'est donc pas indispensable, mais nous verrons qu'il y est très utile, car il accroît dans une très grande mesure la puissance des sons émis par ce récepteur.

Téléphones sans diaphragme et sans aimant. Expériences de M. Ader. — La présence d'un noyau aimanté dans le téléphone récepteur n'est pas indispensable, et nous avons vu que l'électrophone de M. Ader emploie de petits électro-aimants microscopiques en fer doux. En faisant des expériences sur ces appareils, M. Ader a été conduit à construire un récepteur formé d'un loquet de porte B (fig. 101), une tige de fer doux d'un millimètre de diamètre CC', plantée dans une planchette carrée de sapin de 5 centimètres de côté et une petite bobine A roulée sur un tuyau de plume d'oie. Le transmetteur peut être quelconque. On peut, avec ce petit instrument, faire une expérience de *spiritisme* assez amusante en fichant le fil de fer CC' dans une table, par dessous, en dissimulant habilement les conducteurs et en faisant parler dans le transmetteur un compère placé dans une pièce un peu éloignée. Si l'expérience est faite dans le silence, à une heure avancée de la nuit, par exemple, toute la table parle, on peut l'entendre en se plaçant assez près tout autour, et cette expérience produit l'effet le plus singulier sur les personnes crédules ou impressionnables.

M. Ader en continuant ses expériences a construit un second téléphone encore plus simple (fig. 102) ; il est formé d'une plan-

chette AB et d'une bobine C sur laquelle est roulé un fil fin avec des spires très peu serrées, collée sur la planchette. L'appareil

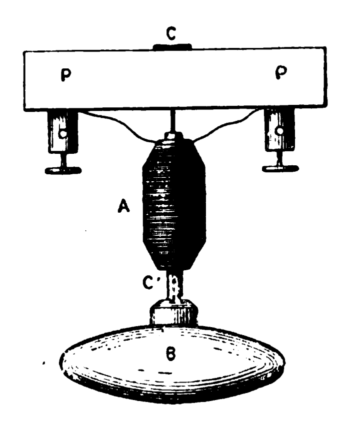


Fig. 101. — Téléphone sans diaphragme et sans aimant de M. Ader.

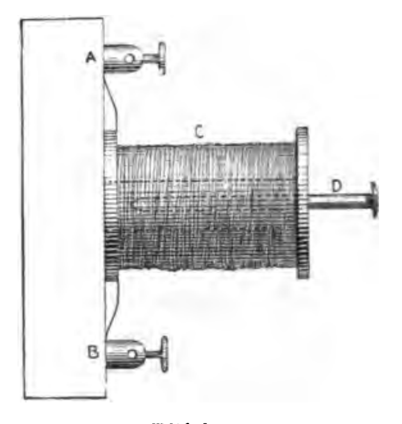


Fig. 102. — Téléphone sans noyau de fer de M. Ader.

parle dans ces conditions sous l'action d'un transmetteur à charbon et de trois piles Leclanché. Si les spires sont trop serrées ou noyées dans la gomme laque, le téléphone ne parle plus, mais en introduisant dans la bobine un clou D, un petit fil de fer ou une aiguille aimantée venant appuyer contre la planchette, aussitôt on perçoit très distinctement la parole. En retirant le clou, le téléphone redevient muet.

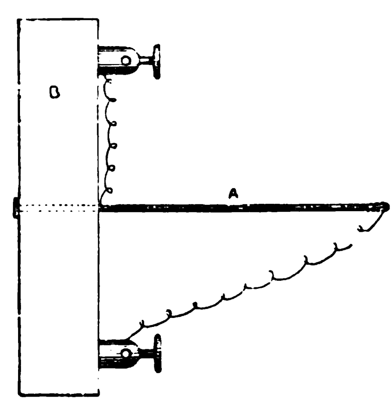


Fig. 103. — Téléphone à fil de fer de M. Ader.

Téléphone sans diaphragme, sans aimant et sans bobine. — Le téléphone récepteur ci-contre est encore plus simple. Il se compose d'une tige de fer doux A (fig. 103) et d'une planchette de bois B. En appliquant la planchette B contre l'oreille et une masse métallique pesante à l'autre extrémité du fil A, M. Ader a pu repro-

duire la parole en employant un transmetteur à charbon. De la Rive, en 1846, avait constaté les sons produits dans des conditions analogues avec des courants *interrompus*, mais M. Ader est le premier qui ait reproduit les sons articulés par des moyens aussi simples.

M. *Percival Jenns* a construit aussi un téléphone récepteur sans diaphragme ni aimant formé d'une carcasse de bobine en fer, garnie de fil comme les bobines des électro-aimants ordinaires. L'appareil reproduit la parole en employant comme parleur le transmetteur à charbon d'Edison. Tous ces phénomènes s'expliquent simplement par les effets de Page que Reiss a appliqués pour la première fois à son téléphone musical.

Téléphone thermique de M. Preece. — M. *Wiesendanger*, en septembre 1878, rapportait la reproduction de la parole, dans certains téléphones, à des mouvements vibratoires résultant de dilatations et contractions moléculaires déterminées par des variations d'échauffement résultant des courants d'intensité variable transmis à travers les circuits téléphoniques : on lui faisait une objection tirée de la lenteur des phénomènes calorifiques dont l'action matérielle ne serait pas assez prompte pour produire des vibrations.

M. *Preece*, ingénieur en chef du Post-office de Londres, a repris ces études, et, après une série de tâtonnements, est arrivé à construire un véritable *téléphone thermique* formé d'un fil de platine de sept ou huit centièmes de millimètre de diamètre et 15 centimètres de longueur, fixé par l'une de ses extrémités à un support et par l'autre à un disque en carton ou une plaque vibrante.

L'appareil simple de M. Preece fonctionne avec un parleur à charbon d'Edison ; les effets sont dus à la rapidité avec laquelle les fils fins gagnent et perdent leur température et à la sensibilité extrême à la dilatation des fils fins de grande résistance électrique.

Microphones transmetteurs employés comme récepteurs. — M. Preece attribue à des causes analogues les

phénomènes observés pour la première fois par M. Hughes, peu de temps après la découverte du microphone. M. Hughes montra que le microphone était reversible, comme le téléphone magnétique, c'est-à-dire capable de transmettre ou de recevoir les vibrations. Il n'y a donc plus ici ni plaque, ni bobine, ni aimant, ni fil magnétique. Rien que deux morceaux de charbon à chaque poste reliés par deux conducteurs avec une pile intercalée dans le circuit.

L'expérience est à la vérité assez délicate, mais elle réussit fort bien avec un microphone sensible.

MM. *Pollard* et *Garnier* ont pu aussi faire parler leur transmetteur à charbon de la même manière, et M. *Carlo Resio*, de Gênes, est parvenu à faire parler un *transmetteur à liquide* comme récepteur. Il est impossible d'expliquer exactement, dans l'état actuel de la science, ce qui se passe dans ces transmissions téléphoniques.

Microphone parleur-transmetteur de M. Blyth. — Dans une boîte plate de 30 centimètres de longueur sur 20 de largeur, M. *Blyth* dispose des charbons échappés à la combustion et désignés en Angleterre sous le nom de *cinders gas*, deux plaques de fer-blanc aux extrémités de cette boîte remplie de cinders gas, et le microphone est constitué. D'après M. Blyth, en plaçant deux microphones semblables sur le circuit d'une pile de deux éléments de Grove *on peut entendre* la parole émise devant l'un de ces microphones, l'autre fonctionnant comme récepteur.

M. *du Moncel* a modifié l'appareil de Blyth en employant des fragments de coke un peu gros et deux électrodes, l'une en zinc, l'autre en cuivre. En mettant de l'eau dans la boîte et en attachant les deux électrodes de l'appareil ainsi constitué aux deux bornes d'un téléphone Bell, on constitue un système téléphonique dans lequel *la pile sert de transmetteur*. Les variations de résistance intérieure dues aux légers mouvements du charbon dans cette singulière *pile-microphone* produisent les courants ondulatoires qui se transforment en paroles articulées dans le récepteur.

Électro-motograph d'Edison. — Dans ce téléphone, nous n'avons à signaler que le récepteur, car le transmetteur n'est autre que le transmetteur à charbon d'Edison.

Examinons d'abord le principe de l'appareil qui a permis à Edison de construire l'*électro-motograph.* Trempons une feuille de papier buvard dans une solution saturée de potasse et plaçons-la sur une plaque métallique, reliée au pôle positif d'une pile composée de deux ou trois éléments Leclanché. En promenant à la surface du papier une lame de platine de 1 centimètre de largeur environ et en exerçant sur cette lame une certaine pression, nous sentirons une *résistance au glissement*, résistance due au frottement de la lame sur le papier dont la surface présente une certaine rugosité. Si, tout en faisant glisser la lame de platine, nous la mettons en communication avec le pôle négatif de la pile, la résistance au glissement va être diminuée dans de très grandes proportions : le courant électrique a pour effet de lisser, de lubrifier, de savonner en quelque sorte, la surface du papier rugueux à l'origine, de *diminuer le coefficient de frottement* entre la lame de platine et la surface du papier. Cet effet du courant électrique est proportionnel à l'intensité du courant, commence avec lui et s'achève avec lui ; il est tellement sensible que les plus faibles courants, ceux, par exemple, qui sont sans action sur les électro-aimants, sont rendus ici très perceptibles.

Il est bien difficile de dire exactement ce qui se passe dans ce phénomène ; pour nous, il nous suffit de retenir l'effet et de nous rappeler qu'un courant électrique d'intensité variable peut produire un glissement variable et proportionnel à son intensité. Cela bien établi, il est facile de voir comment fonctionne le récepteur d'Edison dont la figure 104 représente une vue intérieure et la figure 105 le diagramme de principe. Une lame mince de mica de 8 à 9 centimètres de diamètre porte à son centre une lame de platine C qui vient s'appuyer sur le cylindre A avec une pression constante due au ressort S et réglée par la vis E. Le cylindre A est fait avec une pâte composée de chaux, d'hydrate de potasse et d'une petite quantité d'acétate de mer-

cure. Cette pâte joue le rôle du papier imbibé de la solution de potasse dans l'expérience précédente.

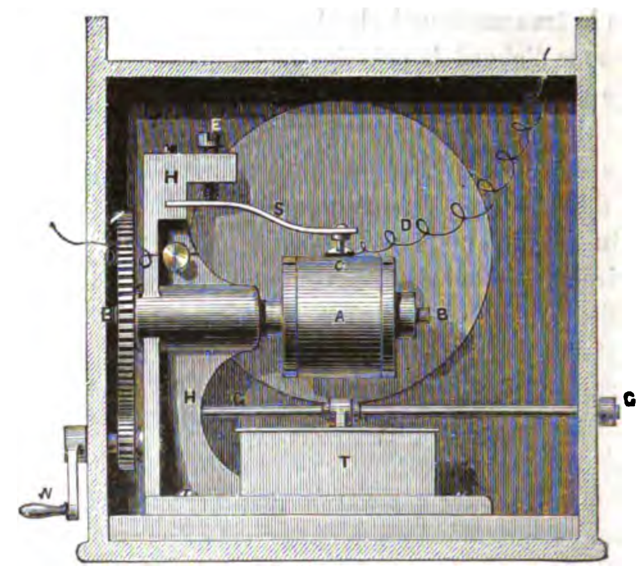


Fig. 104. — Vue intérieure de l'*électro-motograph* d'Édison.

A, cylindre de chaux et de potasse hydratée ; — B, axe du cylindre mis en mouvement par la manivelle N ; — C, lame de platine reliée à la membrane de mica ; — D, fil de ligne ; — E, vis de réglage du ressort S ; — H, support ; — S, ressort venant exercer une pression convenable sur la lame C ; — T, réservoir contenant une dissolution de potasse ; — G, levier servant à manœuvrer le rouleau humecteur.

Ce cylindre tourne d'un mouvement régulier à l'aide d'un engrenage et de la manivelle W.

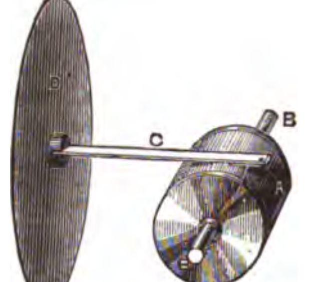


Fig. 105. — Diagramme du récepteur électro-chimique d'Edison.

Le courant électrique venant du transmetteur arrive par le bâti H, traverse le cylindre A recouvert de la pâte, la lame de platine et sort par le fil D pour aller à la terre. En faisant tourner le cylindre A (fig. 105) dans le sens des aiguilles d'une montre, le frottement entre la lame C et la surface du cylindre A produira une traction sur la lame C et la plaque de mica, à cause de son élasticité, prendra une certaine position d'équilibre qui

dépendra de la traction de la lame C et par suite du frottement entre A et C ; chaque variation dans l'intensité du courant qui traverse A et C se traduira donc par une variation dans la traction de la lame C ; il en résultera un certain déplacement de la lame de mica qui vibrera ainsi synchroniquement avec le courant ondulatoire et, par suite, synchroniquement aussi avec la lame du transmetteur.

Le mouvement vibratoire de la plaque de mica n'est pas obtenu directement par le courant électrique ; il est produit mécaniquement par la rotation du cylindre A, le courant produit seulement une sorte d'embrayage à glissement variable, ce qui explique la grande puissance de l'instrument.

D'autre part, la lame de mica présentant une faible inertie et une assez grande élasticité obéit très bien aux efforts que la lame C lui transmet. Le sens de la rotation est indifférent, la lame de platine C agit, suivant les cas, en tirant ou en poussant la plaque de mica.

La substance qui recouvre le cylindre A doit toujours rester humide.

Dans les modèles plus perfectionnés, le cylindre est formé d'une composition qui peut rester *sèche*, ce qui enlève au téléphone chimique une partie assez fastidieuse de son fonctionnement.

La main organe récepteur d'un système téléphonique. — En poursuivant ses expériences sur la transmission des sons musicaux, M. Gray arriva à construire un téléphone dans lequel *la main de l'opérateur* servait de récepteur.

Le phénomène fut d'abord observé par M. Gray sur la doublure en zinc d'une baignoire, et voici comment l'auteur décrit l'appareil auquel il fut conduit :

L'instrument est composé d'un support métallique d'un poids suffisant pour le maintenir fixe pendant la manipulation. Sur le support est monté un arbre horizontal reposant sur des coussinets. L'une des extrémités de l'arbre porte une manivelle dont la poignée est faite d'une substance isolante; sur l'autre extrémité est fixée une caisse en bois mince, sonore et

de forme cylindrique, dont la surface est revêtue d'une garniture ou coiffe de métal à laquelle on donne une forme convexe pour plus de solidité. Cette caisse a une ouverture au centre afin d'augmenter les qualités sonores. La caisse de métal est en communication électrique avec le support métallique au moyen d'un fil. Si l'opérateur relie la garniture métallique à la terre par l'intermédiaire du support, et, saisissant d'une main l'extrémité de la ligne, presse les doigts contre la caisse qu'il fait tourner de l'autre main au moyen de la manivelle, le son émis à l'extrémité de la ligne est entendu distinctement même dans toute l'étendue d'une salle très grande. Ces conditions étant bien remplies, plus on donne un mouvement rapide à la plaque, plus les sons musicaux sont clairs; plus le mouvement est lent, plus le son est doux. Lorsque le mouvement s'arrête, le son cesse complètement.

Téléphone à mercure de M. Antoine Breguet. — L'appareil de M. Breguet met en action les forces électro-capillaires et les courants électriques qu'elles développent. Le phénomène est absolument reversible : le transmetteur et le récepteur sont donc deux appareils identiques.

Le téléphone à mercure ne diffère de l'électromètre de M. Lippmann qu'en ce qu'il est plus simple et de plus petit volume.

La pointe d'un tube capillaire T (fig. 106), contenant du mercure M, plonge dans un vase V. Dans ce vase se trouve une couche de mercure M′, surmontée d'eau acidulée A, de facon que la pointe capillaire ne pénètre pas dans la couche de mercure, mais seulement dans l'eau acidulée. Deux fils de platine P et Q communiquent respectivement avec le mercure M et le mercure M′.

Si ces deux fils sont réunis entre eux, le niveau du mercure dans le tube capillaire s'établira à une hauteur invariable. Mais, si l'on interpose dans le circuit une source électrique, le niveau prendra une autre disposition d'équilibre.

En résumé, à chaque différence du potentiel correspondra un niveau déterminé à la surface inférieure du mercure. Au-dessus du mercure M se trouve une masse d'air S dont la pression variera évidemment toutes les fois que le niveau du mercure variera lui-même.

Accouplons deux appareils semblables, en faisant communi-

quer les fils P et P_1, Q et Q_1, ainsi que le montre la figure 106. Exerçons une pression S ; une force électro-motrice dépendant de la valeur de cette pression prendra naissance dans le circuit, et cette force électro-motrice produira un changement dans le niveau du mercure M_1 du second appareil. La pression en S_1 y sera par conséquent modifiée.

Si l'on parle au-dessus du tube T, l'air contenu dans ce tube entre en vibration. Ces vibrations sont communiquées au mercure qui les traduit en variations de force électro-motrice, et ces variations engendrent dans l'appareil récepteur des vibrations

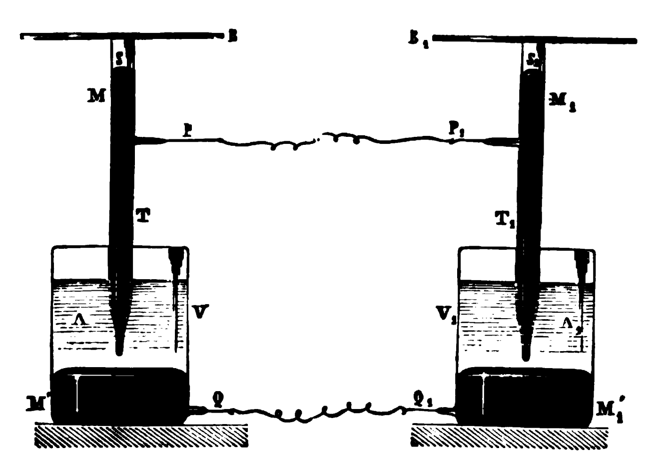


Fig. 106. — Téléphone à mercure de M. A. Breguet.

exactement correspondantes de la masse d'air S_1, de sorte que, si l'oreille se trouve placée au-dessus du tube T_1, on entendra toutes les paroles prononcées dans le tube T.

Condensateur parlant. — A peu près vers la même époque, *C. Herz*, d'une part, M. *Dunand*, d'autre part, sont parvenus à faire *parler* le condensateur. La disposition employée par M. Dunand est des plus simples. On place sur le circuit *inducteur* d'une petite bobine d'induction une pile de quelques éléments et un transmetteur à charbon quelconque, Edison, Hughes, Ader, etc. On place le condensateur sur le circuit *induit* en intercalant une

pile de quelques éléments en tension, Daniell ou Leclanché.

Dès que l'on retire les éléments du circuit induit, le condensateur cesse de reproduire les sons articulés. Il semble ressortir des expériences que le condensateur ne reproduit la parole sous l'influence des courants induits ondulatoires qu'à la condition que sa charge soit toujours de même sens.

Plus récemment M. *Maiche* est parvenu à employer le condensateur comme *transmetteur*, en se servant d'un téléphone Bell à fil fin comme *récepteur*.

Nous n'en finirions pas s'il fallait énumérer toutes les expériences curieuses de transmissions téléphoniques. Depuis la découverte de M. Gaham Bell, on a beaucoup multiplié le nombre et la nature des systèmes propres à transmettre à distance les sons articulés, mais il était réservé au célèbre savant américain de produire les plus curieux de tous en créant le *photophone*, un appareil transmettant la parole à distance par l'intermédiaire d'un rayon lumineux. Avant de décrire cet appareil, nous dirons quelques mots de la théorie du téléphone qu'il est maintenant plus commode d'aborder, après l'examen des téléphones spéciaux, où nous avons mis successivement et séparément en jeu les actions si complexes qui caractérisent le téléphone d'articulation.

Théorie du téléphone. — La théorie du téléphone transmetteur ne souffre aucune difficulté et a été exposée plusieurs fois au cours de cette étude, nous n'y reviendrons pas. Les discussions qui se sont produites au sujet de la théorie du téléphone avaient surtout trait à l'appareil récepteur. Comment un récepteur téléphonique, un téléphone Bell par exemple, transforme-t-il un courant ondulatoire en son articulé? Quels sont les phénomènes physiques qui concourent à cette transformation ?

Nous avons admis comme *théorie provisoire*, commode pour l'explication des appareils, que le courant ondulatoire produisait dans le récepteur des renforcements et des affaiblissements successifs de la puissance magnétique de l'aimant, se traduisant par

des attractions plus ou moins grandes de la plaque *vibrant* alors synchroniquement avec les ondulations du courant et de la puissance magnétique du barreau aimanté.

Cette explication possible et quelquefois vérifiée dans les téléphones à pile avec transmetteur à charbon est inadmissible avec le téléphone Bell.

Il résulte d'expériences et de mesures nombreuses faites par MM. *Waren de la Rue*, *Brough*, *Galileo Ferrari*, que l'intensité des courants développés par un téléphone Bell ne dépasse pas celle d'un élément Daniell qui aurait traversé *cent millions de ohms*, ce qui représente un circuit télégraphique d'une longueur égale à 250 fois le tour de la terre.

Les expériences de M. Breguet, faites avec des plaques de 15 centimètres d'épaisseur, et celles de M. Ader qui n'emploie pas de plaque du tout, rendaient difficile une explication basée *seulement* sur les attractions magnétiques.

Les expériences de Page ont montré qu'une tige de fer placée dans une bobine vibre sous l'action de courants interrompus. Le téléphone musical de Reiss est, comme nous l'avons vu, une application de ce phénomène.

Ces vibrations sont déterminées au sein du noyau magnétique par suite des aimantations et des désaimantations de ce noyau. Dans le téléphone Bell, le noyau vibre donc *longitudinalement* sous l'action du courant ondulatoire qui traverse la bobine.

Ce deuxième phénomène ne suffit pas cependant à expliquer le téléphone de M. Ader sans noyau magnétique ; il faut admettre une troisième action due aux réactions des spires de l'hélice les unes sur les autres. Dans d'autres cas, il se produit aussi des réactions entre l'hélice et le barreau magnétique qui contribuent à la production des sons.

Enfin, on constate quelquefois une cinquième action, d'origine purement mécanique, se produisant comme la transmission des sons à travers les corps solides.

Dans un téléphone donné, ces cinq actions principales ne se produisent pas toutes au même degré : quelquefois l'une d'elles

est prédominante, d'autres disparaissent complètement; dans certains cas toutes les cinq agissent, quoique à des degrés différents. Dans certains téléphones la vibration propre de la plaque joue un rôle assez considérable pour donner aux transmissions un timbre de *Polichinelle* tout particulier, mais ce fait doit être attribué surtout au transmetteur qui envoie dans la ligne un courant ondulatoire *déformé* par l'action propre de sa plaque vibrante.

Il ne faudrait pas cependant admettre d'une façon absolue que les courants téléphoniques provenant d'un transmetteur magnétique ne puissent produire les vibrations d'un diaphragme, par attractions purement magnétiques. L'avertisseur de M. Ader fonctionne avec les courants développés par le téléphone magnétique de M. Gower. Il y a bien là une action magnétique directe produisant une véritable attraction.

Nous devons conclure de ces quelques considérations, que nous n'avons pas le loisir de développer davantage dans un ouvrage élémentaire, que la théorie du téléphone est fort complexe et qu'il est très difficile de déterminer l'importance du rôle joué par chacune des actions que nous venons de définir. Les discussions nombreuses provoquées par cette théorie viennent de ce que l'on a exagéré l'influence de chacune de ces actions individuellement et aux dépens des autres. La vérité est qu'elles sont simultanées et se produisent avec des valeurs relatives différentes pour chaque cas particulier. Il faut donc rejeter toute théorie basée sur un mode d'action *exclusif*, et par conséquent *incomplète*.

PHOTOPHONES ET RADIOPHONES.

Le *photophone*, comme son nom l'indique, est un appareil qui *parle par la lumière*, en d'autres termes, un appareil qui transmet la parole à distance par l'intermédiaire d'un rayon lumineux. C'est un *téléphone sans fil*. Le nom de photophone a été tout

d'abord donné à l'appareil par son inventeur. On a reconnu depuis qu'il n'était pas nécessaire que les radiations fussent lumineuses pour transmettre la voix à distance. M. *Mercadier* a proposé le nom de *radiophone*, aujourd'hui universellement adopté, et fort justement à notre avis, car il ne préjuge rien de la nature des radiations qui agissent sur les appareils, que ces radiations soient seulement actiniques, ou lumineuses, ou thermiques, soit que les trois sortes de radiations concourent à la fois à la production du phénomène.

M. Graham Bell avait pressenti depuis longtemps déjà la réalisation du photophone. En effet, dans un Mémoire présenté à la Société Royale de Londres le 17 mai 1878, il avait annoncé qu'en faisant tomber sur une plaque de sélénium une vive lumière et qu'en l'interrompant brusquement, on pouvait *entendre l'effet de cette ombre* tombant sur le sélénium : nous allons voir quel brillant parti l'inventeur a su tirer de cette idée première. Le photophone est fondé sur les propriétés du *sélénium* que nous allons rapidement examiner.

Le sélénium, découvert par Berzelius en 1817, fait partie de la deuxième famille des métalloïdes, avec l'oxygène, le soufre et le tellure. Il fond à 210° et entre en ébullition vers 700°.

En 1837, Knox découvrit que le sélénium fondu devient conducteur de l'électricité, et, en 1852, Hittorff montra qu'il est aussi conducteur à la température ordinaire, mais seulement dans un état allotropique spécial qu'il étudia. A l'état vitreux, le sélénium est brun foncé, noir par réflexion, et très brillant. Il est rouge et transparent lorsqu'il est réduit en feuilles minces. En le faisant fondre et en le refroidissant très lentement, il prend la couleur du plomb, affecte une structure cristalline et présente toutes les apparences d'un métal. C'est la variété allotropique étudiée par Hittorff.

L'influence de la lumière sur la conductibilité électrique du sélénium fut découverte par un télégraphiste de Valentia, M. May, en faisant des expériences sur l'isolement des câbles sous-marins.

Le 12 février 1873, M. Willoughby Smith annonça le fait à la Société des ingénieurs télégraphistes de Londres. Ce fut l'origine

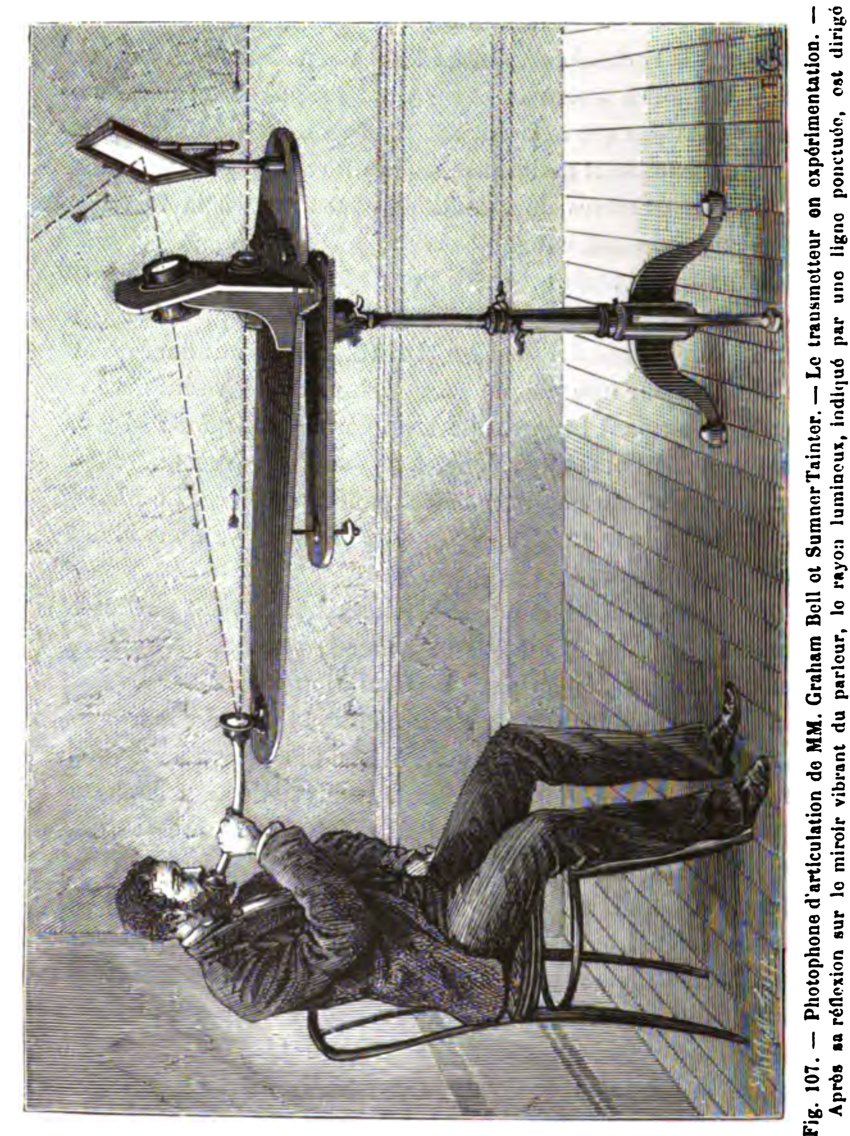


Fig. 107. — Photophone d'articulation de MM. Graham Bell et Sumner Tainter. — Le transmetteur en expérimentation. — Après sa réflexion sur le miroir vibrant du parleur, le rayon lumineux, indiqué par une ligne ponctuée, est dirigé vers le réceptacle placé au loin.

des recherches entreprises depuis par MM. Sale, Draper, Moss, Werner Siemens, Sabine, Adams et Day, Forssmann, et en der-

nier lieu par MM. Graham Bell, Sumner Tainter et Mercadier.

Le sélénium exposé à la lumière change instantanément de

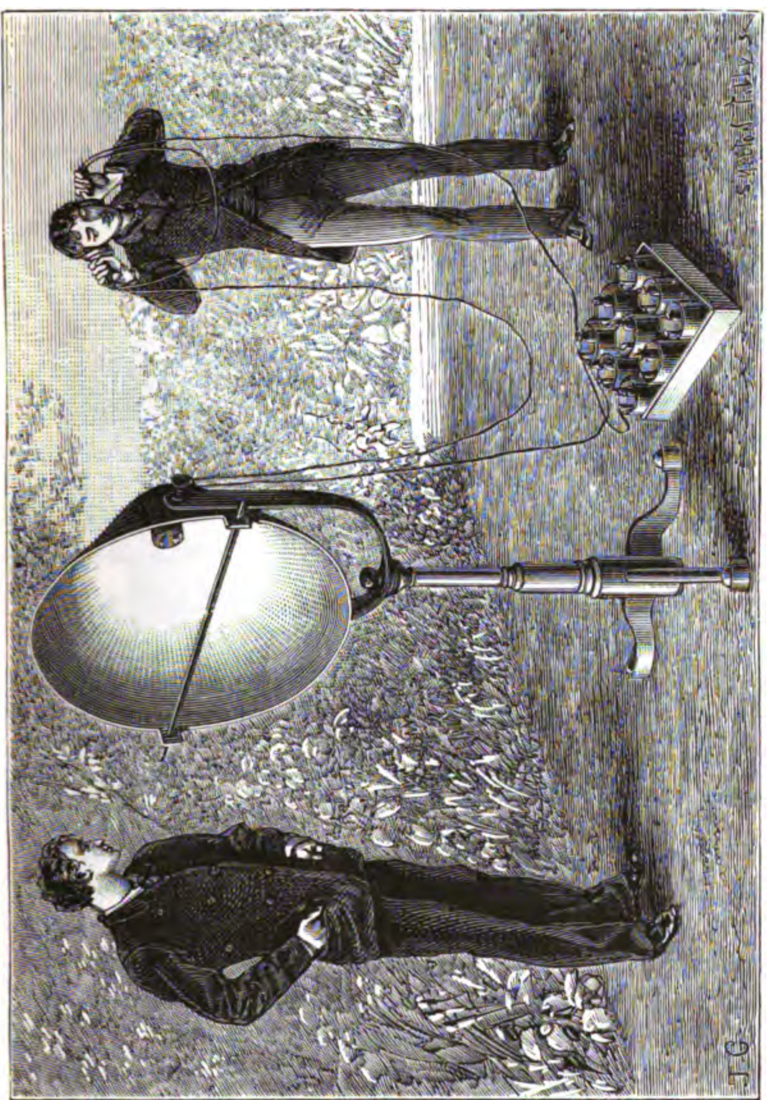


Fig. 108. — Le récepteur du photophone d'articulation. — Les paroles transmises par les rayons lumineux sont entendues dans les téléphones reliés à l'appareil.

résistance électrique. Dans certains échantillons fabriqués par M. Siemens, en représentant par *quinze* la résistance électrique

dans l'obscurité, cette résistance n'était plus que *un* à la lumière solaire.

Après cet exposé préliminaire des propriétés du sélénium, nous pouvons aborder la description du photophone d'articulation. Le modèle le plus pratique, celui qui a donné les meilleurs résultats et qui a été présenté à l'Académie des sciences le 18 octobre 1880, est représenté figures 107 et 108; la figure 109 est un diagramme de son fonctionnement.

Le transmetteur se compose d'une petite lame mince de verre

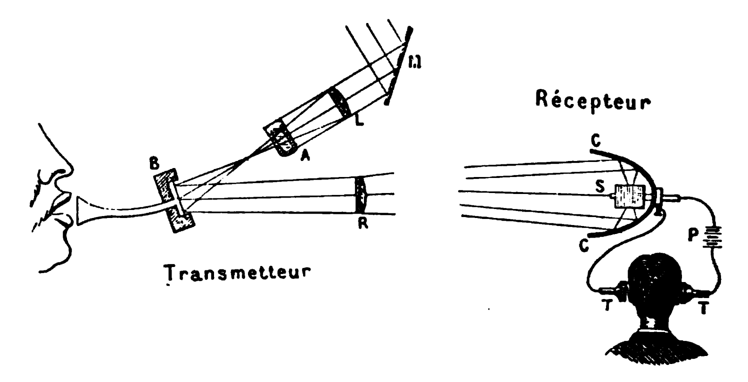


Fig. 109. — Diagramme théorique du photophone d'articulation (d'après un croquis dessiné par M. Graham Bell).

Transmetteur. — M, miroir projetant la lumière solaire. — L, lentille convergente. — A, cuve transparente contenant de l'alun. — B, support du miroir vibrant. — R, lentille pour rendre les rayons réfléchis parallèles.
Récepteur. — CC, miroir parabolique de cuivre argenté. — S, sélénium préparé. — P, pile. — TT, téléphones.

argenté, de la grandeur d'une plaque de téléphone ordinaire, encastrée dans un support B, lequel est adapté à l'extrémité d'un tuyau en caoutchouc de cinquante centimètres de longueur.

A l'aide d'un miroir M et d'une lentille convergente achromatique L, on fait tomber sur cette plaque argentée les rayons d'une lumière électrique ou de la lumière solaire.

Les rayons réfléchis par le miroir argenté traversent en R une seconde lentille qui les renvoie sur le récepteur après les avoir rendus sensiblement parallèles. Un système de vis calantes sert à diriger le faisceau sur le récepteur (fig. 109).

En parlant dans l'embouchure, la plaque de verre argenté vibre, se bombe plus ou moins, dilate, répartit le faisceau sur une surface plus ou moins grande et fait varier, synchroniquement avec ses vibrations propres, l'intensité des rayons envoyés dans la direction du récepteur.

Le récepteur, placé à distance (fig. 109), se compose d'un réflecteur en cuivre argenté CC, de forme parabolique, de soixante-dix centimètres de diamètre environ. Le sélénium préparé est placé au foyer S de ce miroir parabolique. Une pile de neuf éléments Leclanché P, et deux téléphones Bell ordinaires à fils très fin TT,

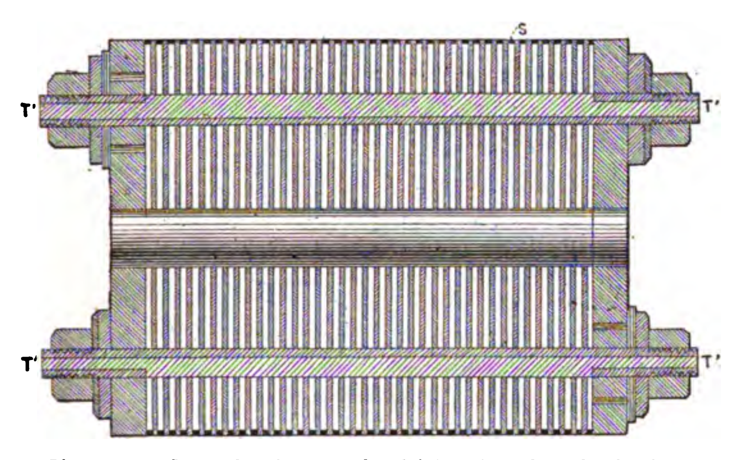


Fig. 110. — Coupe du récepteur de sélénium (grandeur d'exécution).

sont mis dans le circuit du sélénium préparé, qui joue dans ces conditions le rôle de *microphone à lumière*, sa résistance électrique variant à chaque instant avec l'intensité du rayon lumineux qui le frappe.

La disposition employée par MM. Bell et Tainter, pour former le récepteur, est des plus curieuses. Il fallait à la fois que le sélénium offrît une grande surface à la lumière et opposât une très faible résistance au passage du courant. Il semblerait au premier abord que ces conditions fussent en quelque sorte incompatibles.

Le sélénium préparé, représenté ci-dessus en coupe (fig. 110), et en un diagramme figuré ci-contre (fig. 111), montre comment

la difficulté a été levée. Le système se compose d'une série de disques de laiton, séparés par des disques de mica d'un diamètre légèrement plus faible ; les vides annulaires sont remplis par du sélénium, — représenté en noir sur les fig. 110 et 111, — de telle sorte que le récepteur présente l'aspect d'un cylindre uni de neuf centimètres de longueur sur cinq centimètres de diamètre environ. Les disques de rang pair sont tous reliés entre eux et se joignent à un rhéophore N ; ceux de rang impair à un second rhéophore M, chaque rhéophore se relie au téléphone T.

Grâce à cette disposition, la surface du sélénium est grande relativement à sa masse, et tous les anneaux de sélénium étant traversés par le courant *en quantité*, ne lui offrent qu'une faible

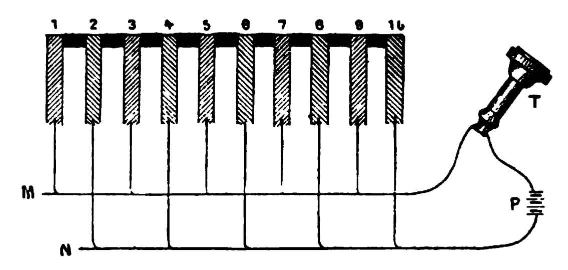


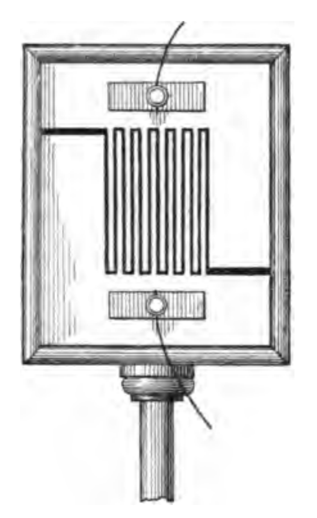
Fig. 111. — Figure schématique pour expliquer la construction du récepteur de sélénium.

résistance qui diminue avec leur nombre; on voit que chaque fois qu'il s'ajoute un anneau de plus, la surface du sélénium exposée à la lumière, *augmente*, tandis que la résistance électrique du système diminue. Dans l'obscurité, la résistance du récepteur ainsi constitué est de 1200 *ohms*, et de 600 *ohms* à la lumière du jour.

Voici comment se prépare le récepteur, dont nous n'avons encore fait comprendre que le principe. Après avoir empilé les disques successifs de laiton et de mica, on maintient l'ensemble de l'appareil à une température voisine de celle à laquelle fond le sélénium. On frotte alors la surface du récepteur avec un crayon de sélénium ordinaire; le sélénium se loge dans les espaces annulaires. On élève ensuite graduellement la température du ré-

cepteur jusqu'à ce que l'aspect métallique du sélénium disparaisse et soit remplacé par une couleur mate d'un gris-ardoise. On éteint alors l'appareil de chauffage, on laisse refroidir, et le récepteur est prêt à fonctionner.

L'appareil ainsi constitué est d'une extrême sensibilité ; il obéit à toutes les variations d'intensité de la lumière qui le frappe, au point qu'on entend dans le téléphone récepteur toutes les variations provenant de la source lumineuse, quand elle est constituée par un régulateur électrique. L'appareil reproduit le chant et la parole articulée avec une netteté et une exactitude remarquables.



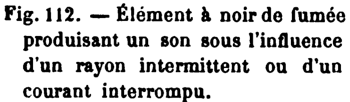


Fig. 112. — Élément à noir de fumée produisant un son sous l'influence d'un rayon intermittent ou d'un courant interrompu.

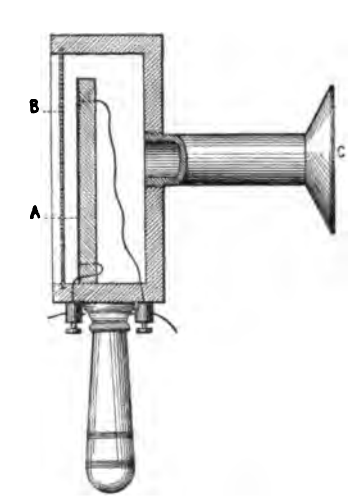


Fig. 113. — Disposition de l'appareil pour l'action simultanée d'un courant électrique interrompu et d'un rayon intermittent.

Lorsqu'on emploie, au lieu du transmetteur à miroir, un disque interrupteur, les sons produits sont beaucoup plus intenses, et il n'est pas nécessaire d'appliquer le téléphone contre l'oreille pour les entendre. La lumière interrompue d'une bougie suffit pour produire un son, et il a été ainsi possible de transmettre des sons et de constituer un téléphone acoustique lumineux à plus de

deux kilomètres de distance, en employant une source lumineuse assez intense.

MM. Bell et Tainter ont imaginé un grand nombre de formes de transmetteurs pour leur photophone d'articulation : il serait trop long de les décrire. Le photophone a fonctionné jusqu'ici à 213 mètres de distance en transmettant la parole articulée. Si l'on se contente d'envoyer sur le sélénium des rayons lumineux *interrompus* et non *ondulatoires*, l'appareil fonctionne déjà à plus de deux kilomètres de distance. Avec des appareils plus sensibles, et une source lumineuse plus intense, on pourra certainement doubler cette distance, et l'appareil sera alors susceptible d'application au service de la guerre dans les places assiégées.

Radiophone à tellure et à noir de fumée. — Le professeur W. G. Adams, de Londres, montra que le *tellure*, comme le sélénium, change de résistance sous l'influence de la lumière, et MM. Bell et Tainter essayèrent de remplacer le sélénium par le tellure dans leur récepteur photophonique. Le récepteur ainsi construit, bien que ne donnant pas d'indication sur sa sensibilité avec un galvanomètre à réflexion, donnait des sons dans un téléphone. M. Bell fit un alliage de sélénium et de tellure, qui, à cause des propriétés électriques extrêmes de ces deux corps, devait avoir des propriétés moyennes.

En songeant aux grands mouvements moléculaires produits par l'action d'un rayon intermittent sur le noir de fumée, M. Tainter pensa qu'une variation analogue se produirait dans le courant qui le traverse et qu'on pourrait alors remplacer le sélénium par le noir de fumée dans le récepteur électrique.

L'expérience a confirmé cette idée et l'importance de la découverte est grande si l'on tient compte du prix élevé du sélénium et du tellure.

La figure 112 représente l'élément à noir de fumée qui a donné les meilleurs résultats. On recouvre une glace d'une couche d'argent et l'on enlève la pellicule suivant une ligne en zigzag, de façon à former deux parties parfaitement isolées ayant l'aspect de deux peignes dont les dents s'emboîtent réciproquement.

Chaque peigne est attaché à un écrou, de façon à pouvoir intercaler l'élément dans un circuit électrique.

On fume alors la surface, de façon à remplir de noir de fumée tout l'intervalle compris entre les dents des deux peignes. Lorsque l'élément à noir de fumée est relié à un téléphone et à une pile, et est exposé à l'influence d'un rayon intermittent, un son musical intense est produit dans le téléphone. Ce résultat semble dû plutôt aux conditions physiques de la substance conductrice qu'à sa nature, et un métal quelconque, à l'état spongieux, produit des effets analogues. En employant une bobine d'induction, on augmente les effets, et les éléments sensibles peuvent être employés aussi bien pour la reproduction de la parole articulée que pour les sons musicaux.

L'élément à noir de fumée reproduit lui-même des sons lorsqu'il est traversé par un courant électrique interrompu, et peut même être employé comme récepteur téléphonique électrique pour la reproduction des sons articulés.

La figure 113 montre la disposition d'une expérience fort intéressante basée sur ces deux propriétés. Lorsqu'un courant interrompu traverse l'élément à noir de fumée, ou lorsqu'un rayon intermittent tombe sur l'élément à travers la glace B, on peut entendre un son puissant en appliquant l'oreille contre le tube C. En faisant agir à la fois le courant électrique interrompu et le rayon intermittent, on perçoit deux sons musicaux distincts qui produisent des battements lorsque leur hauteur est à peu près la même.

Expériences de M. Mercadier. Téléradiophone multiple inverse. — M. Preece, en Angleterre et M. Mercadier ont, depuis la découverte de MM. Beel et Tainter, beaucoup étudié ces phénomènes radiophoniques.

Ils sont parvenus à faire rendre des sons à des *substances quelconques* sous l'action directe des radiations, mais, comme l'électricité n'entre pour rien dans ces phénomènes, leur description ne peut trouver place ici.

Toutes ces découvertes sont d'ailleurs trop récentes pour qu'on

puisse encore en apprécier l'avenir au point de vue des applications. Cependant, tout récemment, M. Mercadier a combiné, en se fondant sur les propriétés électriques du sélénium, un appareil qui peut rendre de grands services dans les transmissions multiples, eu égard à sa simplicité.

La disposition la plus simple consiste à disposer au poste transmetteur une série d'éléments de sélénium à résistance variable, placés dans le même circuit qu'une pile de quelques éléments et la ligne qui se termine au poste récepteur par un nombre égal de téléphones récepteurs. On fait tomber sur les transmetteurs des radiations lumineuses intermittentes, interrompues comme l'alphabet Morse. La hauteur de ces radiations est fixe pour chaque transmetteur, mais différente de l'un à l'autre. Les téléphones récepteurs correspondants sont disposés pour renforcer seulement la note correspondante. Il en résulte que chaque téléphone fera entendre une série de notes *musicales* longues et courtes qui seront interprétées au poste récepteur, par chaque employé comme les signaux Morse ordinaires. M. Mercadier invoque comme avantages de ce système sa très grande simplicité, la continuité du courant qui charge une fois pour toutes le conducteur, les variations très faibles nécessaires à la production des sons influeront peu sur cette charge. Les courants d'induction sur la ligne produiront des *bruissements* qu'il sera impossible de confondre avec les sons musicaux très purs donnés par les téléphones.

M. Mercadier emploie pour ses appareils des éléments à sélénium très simples dont on trouvera la description dans l'*Électricien* du 15 avril 1881 (page 11).

La radiophonie existe depuis à peine une année et l'on entrevoit déjà des applications qu'on n'avait pas soupçonnées lorsque M. May, en 1872, découvrait la curieuse propriété du sélénium. C'est là une preuve de plus que toute découverte scientifique trouve tôt ou tard des applications.

CHAPITRE IV

LES APPLICATIONS DU TÉLÉPHONE

Le téléphone n'a que cinq années d'existence, puisque la découverte de Bell ne remonte qu'à l'année 1876, et il faudrait déjà plusieurs volumes pour passer en revue toutes les applications qu'il a déjà reçues en un si court espace de temps.

Nous choisirons, parmi les applications du téléphone, quelques-unes des plus importantes ou des plus curieures, au premier rang desquelles il convient de placer les communications téléphoniques.

COMMUNICATIONS TÉLÉPHONIQUES.

Cette application du téléphone, toute naturelle d'ailleurs, est celle qui a reçu jusqu'ici le plus grand développement, mais, malgré tout l'avenir qui lui est réservé, — un avenir immense, à notre avis, — nous devons nous tenir en garde contre les exagérations qui ont suivi l'apparition du téléphone.

On avait cru, dans le principe, à une révolution complète du service télégraphique, mais il a fallu en rabattre pour deux excellentes raisons. Le téléphone ne conserve pas trace des messages envoyés et, d'autre part, sa rapidité n'est pas comparable à celle des télégraphes perfectionnés qui, débitent jusqu'à *huit mille mots par heure* avec un seul fil.

Il présente cependant l'immense avantage de pouvoir être employé par le premier venu, sans éducation spéciale ; aussi l'emploie-t-on pour le service des établissements publics, le service des mines, les travaux sous-marins, la marine, l'armée, etc.

Le téléphone, pas plus qu'un autre appareil, ne représente la *panacée* universelle devant guérir tous les maux. Il faut donc employer le téléphone dans tous les cas où il peut rendre des services, et ne pas vouloir l'appliquer dans ceux où il ne remplirait qu'incomplètement les fonctions qu'on pourrait en exiger.

Au point de vue spécial des communications téléphoniques, l'appareil peut et doit jouer un grand rôle que nous allons maintenant examiner.

Communications téléphoniques dans les villes. — Le service de communications téléphoniques en fonctionnement ou en voie d'établissement dans la plupart des grandes villes de l'ancien et du nouveau monde consiste dans l'établissement d'un bureau central en correspondance avec tous les abonnés.

Le bureau central a pour but de répondre aux appels faits par les abonnés, de les mettre, sur leur demande et pendant un temps déterminé, en relation avec l'un quelconque des autres abonnés. On voit déjà tous les avantages de cette combinaison : chaque abonné nouveau constitue pour tous les autres un nouveau correspondant, ce qui accroît chaque jour l'importance et l'utilité du service. Sans entrer dans des considérations générales qui se développent d'elles-mêmes dans l'esprit du lecteur, nous choisirons quelques exemples de communications téléphoniques en décrivant les systèmes employés en Amérique et à Paris pour établir un service régulier de communications.

Les communications téléphoniques en Amérique. — Alors que les communications téléphoniques commencent à peine à se développer à Paris, on compte actuellement dans le nouveau monde plus de 100 villes qui se servent journellement des communications téléphoniques. Pour prendre un exemple dans le service courant, transportons-nous à New-York par

la pensée, et voyons comment fonctionne le service du téléphone. Si nous pénétrons au milieu de la grande salle du bureau central du *Merchant's Telephone Exchange*, établi 198 Broadway, nous verrons une série de *switchmann* (employés) occupés à établir les communications entre les abonnés. Là c'est un switchman correspondant avec un des abonnés qui a appelé (fig. 114) ; plus loin c'est un autre employé occupé à relever le signal d'avertissement (fig. 115). Dans la ville, chez l'abonné, est le *téléphone de bureau*, tel qu'on l'installe dans un grand nombre de maisons (fig. 116) ; ce modèle est très commode pour les affaires, car il permet de parler dans l'embouchure placée à gauche, d'écouter avec le téléphone, qu'on décroche pour l'appliquer à son oreille, et en même temps de prendre des notes sur le pupitre avec la main restée libre.

Avant de suivre la série des opérations qui constituent un appel complet, examinons rapidement le système de téléphones employés dans le bureau de Broadway.

Ce système appartient à la classe des *téléphones à pile*, ce qui permet d'utiliser ces piles pour faire les appels chez les abonnés, à l'aide de sonneries ordinaires, sonneries représentées sur le pupitre de la figure 116.

Transmetteur. — Le transmetteur est le téléphone à charbon d'Edison. Le circuit est formé par la pile, — quatre éléments Leclanché, — le transmetteur est une petite bobine Ruhmkorff sans trembleur. Il constitue le circuit primaire de la bobine. La ligne et le récepteur de l'autre poste sont reliés au fil secondaire de la bobine, fil dont l'autre extrémité est reliée au récepteur du poste et à la terre.

Récepteur. — Le récepteur est un téléphone Pheps, sorte de téléphone Bell, à l'aimant recourbé en forme d'anneau, ce qui rend son maniement assez facile (fig. 116). Dans la position de repos ou d'*attente*, le téléphone est pendu à son crochet, et par ce fait seul, il fait basculer une pièce formant commutateur, qui supprime toute la partie téléphonique du circuit pour n'y intercaler que la sonnerie. On est donc ainsi prêt pour un

appel. En prenant le téléphone à la main, la pièce, en basculant de nouveau, remet automatiquement toutes les communications sur *téléphone*.

Les téléphones des employés du poste central, parleur et récepteur, sont analogues à ceux des abonnés, mais, pour faciliter le maniement de ces appareils, le parleur et le récepteur sont

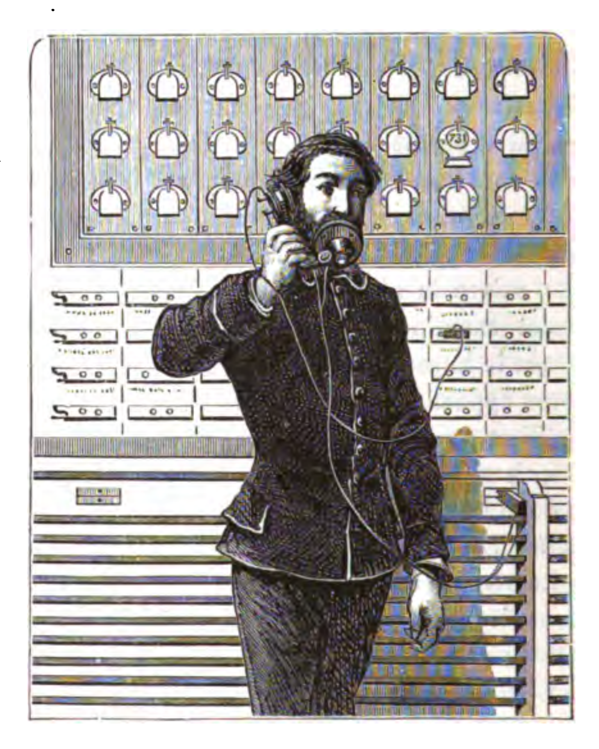


Fig. 114. — *Switchman* ou employé du téléphone correspondant avec un abonné.

montés sur une même tige en acier un peu recourbée qui sert de poignée, comme cela est représenté figure 114, et forme en même temps l'aimant du récepteur. Nous allons pouvoir suivre maintenant toute la série des opérations.

Supposons que l'abonné 731, que nous nommerons Édouard, veuille correspondre avec l'abonné 511, que nous appellerons

Léon. Édouard commence par appuyer sur un petit bouton placé sur le côté droit du pupitre (fig. 116). Comme le téléphone est suspendu, il en résulte que, dans cette position, le courant de la pile d'Édouard traverse la ligne et un petit électro-aimant placé au poste central ; l'électro-aimant devenant actif a pour effet de détacher un petit guichet (fig. 115), qui tombe avec un

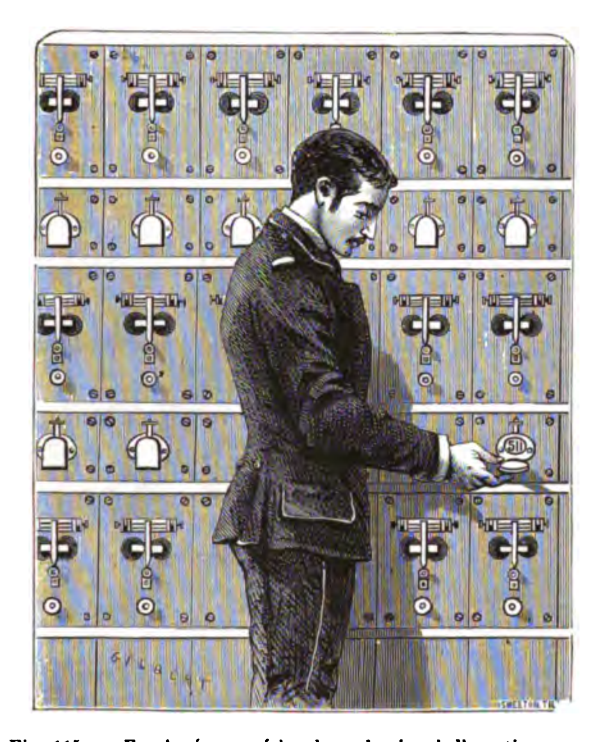


Fig. 115. — Employé occupé à relever le signal d'avertissement.

petit bruit sec suffisant pour appeler l'attention de l'employé, et fait apparaître le numéro 731. L'employé ainsi prévenu se met alors en communication avec Édouard, en plaçant le fil qui correspond à son téléphone sur une barre de cuivre longitudinale reliée aussi à la ligne d'Édouard. La conversation s'engage alors, en commençant par ce cri bizarre, mais, paraît-il, très commode : *Hallo ! Hallo !*

Édouard demande à l'employé de le mettre en correspondance avec le n° 511. Si le n° 511 est libre en ce moment, l'employé appuie sur un bouton après avoir eu soin de relier le fil du n° 511 à ce bouton. La sonnerie de Léon se met en marche, et lorsque Léon est prêt à correspondre, il appuie sur son bouton de sonnerie, ce qui a pour effet de faire tomber le guichet correspondant à son numéro. En mettant alors un fil de com-



Fig. 116. — Téléphone de bureau installé chez un abonné à New-York.

munication directe entre les deux barres horizontales qui correspondent aux fils de ligne d'Édouard et de Léon, la communication entre ces deux correspondants est établie. Si, à ce moment, on oblige l'employé à retirer son téléphone du circuit, la conversation entre Léon et Édouard devient *secrète*. Si, pendant que Léon et Édouard sont en conversation, le n° 42, que nous nommerons Jules, veut correspondre avec Léon par exemple, l'employé peut se mêler à la conversation des deux inter-

locuteurs comme le ferait un domestique venant annoncer un visiteur.

La personne interpellée par l'employé peut donc répondre tout de suite, ou faire annoncer à Jules dans combien de temps elle sera à ses ordres. S'il n'y a aucun inconvénient à ce que la conversation se fasse entre Édouard, Léon et Jules, on peut, en avisant l'employé, établir immédiatement une communication entre ces trois personnes. Cette manœuvre équivaut au « *Faites entrer* » de la vie ordinaire.

Les communications téléphoniques, ainsi conçues et utilisées, peuvent rendre les plus grands services, car elles suppriment les distances et établissent une sorte de *présence réelle* entre les interlocuteurs, qui peuvent s'entendre comme s'ils étaient réunis dans la même pièce, bien que séparés souvent par des distances considérables.

Lorsque la conversation entre Édouard et Léon est terminée, ils accrochent chacun leur téléphone et appuient sur leurs boutons, il en résulte que le numéro de chacun d'eux réapparaît au poste central. L'employé sait alors que la conversation est finie entre les deux interlocuteurs ; il relève les guichets, supprime la communication directe entre Léon et Édouard, et tout est prêt pour un nouvel appel.

Dans les postes où il y a 500 ou 600 abonnés, on doit disposer les numéros par ordre dans des tableaux renfermant chacun 50 à 100 guichets; on emploie alors des dispositions spéciales pour faire communiquer les séries entre elles.

A New-York, le bureau central ne fait pas moins de 1,000 communications par jour, et tout se passe à la plus grande satisfaction des clients. Le téléphone est devenu pour ceux-ci aussi indispensable que les omnibus pour les Parisiens.

Quant aux lignes, elles sont aériennes ou souterraines. Les lignes aériennes ont l'avantage de diminuer les effets nuisibles de l'induction réciproque des fils les uns sur les autres, mais sont d'un effet déplorable et deviendront, si leur nombre se multiplie par trop, une source permanente de dangers. Les lignes

souterraines, d'un maniement plus facile, demandent d'être réunies en grand nombre dans un câble de faible grosseur relative, pour ne pas encombrer les égouts, mais les effets d'induction sont alors très intenses et rendent parfois les communications difficiles. L'emploi d'un *fil de retour*, c'est-à-dire d'un circuit entièrement métallique, réduit ces inconvénients, mais augmente la dépense d'installation. C'est le seul qui, jusqu'ici, ait donné des résultats pratiques.

Les communications téléphoniques commencent à s'introduire dans les mœurs de notre capitale. La *Société générale de téléphones* établie à Paris compte actuellement plus de 1500 abonnés. On a établi d'abord des transmetteurs Édison et des récepteurs Phelps, comme à New-York. On les remplace aujourd'hui par des transmetteurs et des récepteurs Ader, moins délicats, plus sensibles, et qui n'obligent pas à parler dans une embouchure, avantages qui ne sont pas à dédaigner.

Dans le principe, on avait installé des téléphones magnétiques Gower, et dans ce but, M. Ader avait imaginé un appareil des plus ingénieux pour faire déclancher un signal au poste central sous l'action des courants électro-magnétiques du téléphone Gower. On a renoncé aujourd'hui aux systèmes électro-magnétiques parce que les transmetteurs à pile fournissent des effets incomparablement plus puissants.

Auditions théâtrales téléphoniques. — Rien ne met mieux en relief la délicatesse et la puissance des appareils de M. Ader que les auditions théâtrales téléphoniques établies pendant la durée de l'Exposition internationale d'électricité, entre le palais de l'Industrie et les théâtres de l'Opéra, l'Opéra-Comique et les Français. On peut affirmer que ces auditions ont été *le clou* de l'Exposition.

Tous les sons sont transmis avec une merveilleuse délicatesse, sans aucun de ces crachements qui faisaient le désespoir de tous ceux qui avaient essayé jusqu'ici d'employer le microphone à la transmission à distance des effets multiples des soli, des chœurs et de l'orchestre.

Les transmetteurs sont des microphones du système Ader

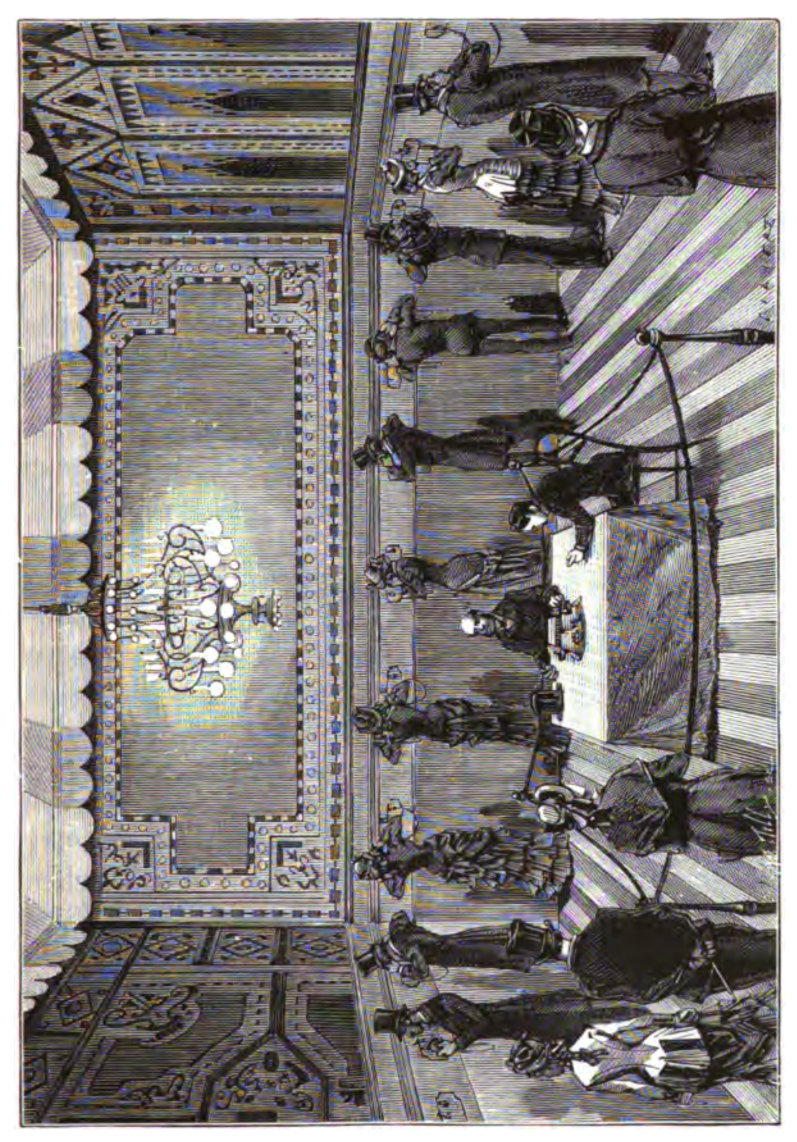


Fig. 117. — Une salle d'audition téléphonique de l'Opéra à l'Exposition d'électricité

placés sur l'avant-scène, du côté de la rampe. A l'Opéra ils sont au nombre de dix, placés derrière les becs de gaz à flamme

renversée. Ils ne diffèrent pas des transmetteurs employés sur le réseau de la Société générale des téléphones.

Nous les avons décrits page 244, nous n'y reviendrons pas. Les 10 récepteurs ont chacun leur pile spéciale, leur bobine d'induction correspondante et leur fil de ligne double complètement indépendant. Comme les piles se polarisent rapidement, un

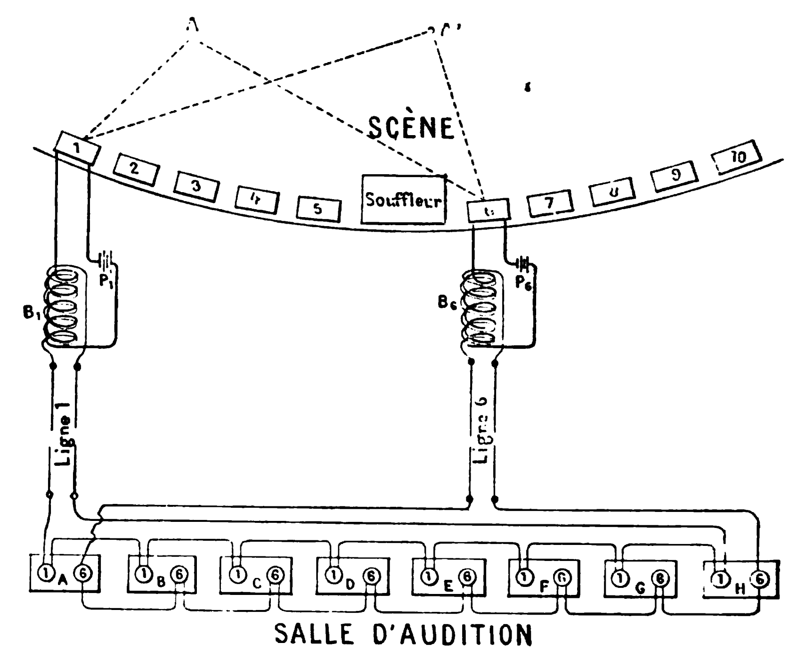


Fig. 118. — Diagramme du montage des téléphones expliquant les effets de *perspective auditive.*

commutateur spécial non représenté permet de changer instantanément les dix groupes de piles à la fois chaque quart d'heure et de les remplacer par des nouvelles. Sur le diagramme de la page 282 (fig. 118) nous avons numéroté les transmetteurs 1, 2, 3 et 10, et nous avons affecté d'indices correspondants les piles P, les bobines B, les lignes et les téléphones récepteurs en relation avec ces lignes.

Les récepteurs sont les téléphones à surexcitation de M. C. Ader que nous avons décrits page 228.

Arrivons maintenant à l'effet acoustique nouveau que M. Ader a découvert et appliqué pour la première fois aux auditions téléphoniques théâtrales de l'Exposition d'électricité.

Tous ceux qui ont eu la bonne fortune d'entendre les téléphones au Palais de l'Industrie ont pu remarquer qu'en écoutant avec les *deux* oreilles dans deux téléphones, l'audition prend un caractère spécial de relief, de localisation, qu'un seul récepteur est impuissant à produire.

Chacun sait en effet, par sa propre expérience, qu'en écoutant dans un téléphone, il est matériellement impossible d'avoir une idée quelconque, même grossière, de la distance à laquelle *paraît être* l'interlocuteur : pour les uns, cette distance n'est que de quelques mètres, pour d'autres, la voix paraît sortir de terre à de très grandes profondeurs.

Ici rien de pareil. Dès que l'audition commence, les personnages se placent, dans l'esprit de l'auditeur, à une distance fixe, les uns à droite, les autres à gauche ; il est facile de suivre leurs déplacements et d'indiquer exactement, chaque fois qu'ils changent de côté, la distance imaginaire à laquelle ils paraissent se trouver l'un de l'autre et du spectateur téléphonique. C'est là évidemment un phénomène des plus curieux ; il touche de près à la théorie de l'*audition binauriculaire*, et n'avait jamais encore été appliqué, croyons-nous, avant M. Ader, à produire cette illusion des plus remarquables à laquelle on pourrait donner le nom de *perspective auditive*.

Nous venons d'exposer le phénomène ; passons maintenant à son explication, qui est des plus simples.

Il faut, pour s'expliquer cet effet, se rappeler le stéréoscope qui permet de voir les objets avec leur relief naturel. Un effet semblable se produit pour l'ouïe, et l'on peut s'en rendre compte en se reportant à la figure 118. Chaque personne placée devant une planchette a deux téléphones qui reçoivent l'impression de deux transmetteurs distincts placés à une certaine distance l'un de l'autre. Ces transmetteurs sont groupés par paires, deux à deux : 1 et 6 ; 2 et 7 ; 3 et 8 ; 4 et 9 ; 5 et 10.

Nous avons seulement représenté le montage complet pour le groupe formé par les transmetteurs 1 et 6. Ce groupe alimente seize téléphones destinés à huit auditeurs, mais le transmetteur 1 sert aux huit téléphones de *gauche* et le transmetteur 6 aux huit téléphones de *droite* des huit auditeurs A, B, C,... H. Lorsque l'acteur est en A, par exemple, le transmetteur 1 est plus influencé que le transmetteur 6, l'oreille *gauche* est plus impressionnée que l'oreille *droite*, le chanteur paraît alors être à *gauche*, pour les huit personnes du même groupe. Lorsque le chanteur est en A', le transmetteur 6 est au contraire plus impressionné que le transmetteur 1, le chanteur paraît être à *droite* des auditeurs. Ces impressions se modifient avec les positions relatives des chanteurs, on entend changer de place, on suit la marche, les croisements des personnages, les déplacements des chœurs, etc.

Les dix transmetteurs servent à 80 téléphones, c'est-à-dire à quarante auditeurs placés dans deux salles disposées pour recevoir chacune vingt personnes. L'installation complète comprend 160 téléphones et quatre salles. Toutes les deux minutes, les communications des téléphones sont changées à l'aide d'un commutateur placé dans le Palais de l'Industrie ; les deux autres salles sont alors mises en relation avec les dix lignes venant de l'Opéra pendant les deux minutes suivantes et ainsi de suite. Sur les 160 téléphones, on n'en a donc que 80 à la fois en activité, et par suite quarante personnes écoutant à la fois, comme nous venons de le dire. On pourrait arriver à donner encore plus de puissance aux effets en augmentant le nombre des lignes et en ne plaçant plus que six téléphones au lieu de huit sur le circuit de chaque transmetteur.

L'emploi du double fil a été nécessaire pour supprimer tout bruit d'induction. C'est jusqu'ici le seul procédé à peu près efficace pour obtenir le résultat cherché, et nous pensons que toutes les dispositions préconisées en dehors de ce procédé coûteux mais simple auraient été impuissantes à l'assurer.

La figure 117 représente une des salles d'auditions téléphoni-

ques du Palais de l'Industrie éclairée par des lampes Swan. Une queue compacte et interminable se pressait aux abords de ces salles, et il n'était pas rare de voir quelques-uns de ceux qui avaient déjà pénétré une fois dans le sanctuaire de la musique téléphonique, se replacer de nouveau à la fin de la foule pour courir les chances de jouir encore une fois pendant deux minutes de ce spectacle curieux et sans précédent.

A quand l'Opéra à domicile?

Téléphones domestiques. — Le téléphone peut recevoir une foule d'applications aux usages domestiques; nous en signalerons seulement quelques-unes. Un locataire peut établir une correspondance téléphonique avec le concierge de la maison, correspondance qui ne saurait être trop appréciée des visiteurs lorsque l'étage est élevé. Un industriel peut correspondre de son bureau avec le chef d'atelier de son usine, un banquier avec sa maison de banque, un directeur de journal avec l'imprimerie, etc.

Pour toutes ces applications, lorsque les distances ne sont pas trop grandes, et c'est le cas le plus général, les téléphones magnétiques sont les plus simples, en leur adjoignant une sonnerie électrique et quelques éléments Leclanché. Le téléphone Gower peut aussi servir dans certains cas lorsque les salles où on doit entendre l'appel ne sont pas trop bruyantes et qu'elles sont toujours occupées, comme les bureaux par exemple.

Pour l'avertissement, on fait usage en Amérique, avec le téléphone de M. Bell, de sonneries électro-magnétiques qui dispensent de l'emploi d'une pile; il suffit de tourner une manivelle pour développer dans un appareil analogue à la machine de Clarke des courants électro-magnétiques assez puissants pour actionner une sonnerie au poste récepteur.

M. *Perrodon* a imaginé pour le service militaire un avertisseur téléphonique très pratique dans lequel le courant d'une petite pile portative envoyé dans la ligne fait vibrer la plaque du téléphone du poste opposé sous laquelle un petit système analogue au trembleur des sonneries produit des courants interrompus.

M. *Trouvé* a modifié l'appareil en rendant le trembleur indépendant du téléphone et en le disposant dans le manche.

MM. *Siemens* et *Ducretet* emploient comme avertisseur de leurs téléphones des systèmes à languette vibrante très peu différents de celui de M. Gower.

Le téléphone de police à Chicago. — Dans chaque ville d'Amérique le département de la police a été des premiers à se servir des communications électriques établies dans un intérêt social et commercial; mais la ville de Chicago tient la tête dans cette application des communications télégraphiques ou téléphoniques; elle les considère comme un facteur essentiel du système de police, le plus important.

Le but du système est double: augmenter, d'une part, la rapidité et l'efficacité des secours de police en cas d'urgence, diminuer, d'autre part, le nombre des patrouilles, et, par suite, les dépenses qu'elles entraînent, en raison du personnel nombreux qu'elles nécessitent pour être utiles.

Le besoin urgent d'un gardien ou d'un agent en un point particulier d'une ville est en général exceptionnel, et la tendance actuelle, en Amérique, est d'augmenter l'espace placé sous la surveillance de l'un d'eux. Il en résulte que, lorsqu'un accident arrive, les agents sont presque toujours loin de l'endroit où leur concours serait nécessaire; les voleurs, qui connaissent bien cette particularité, en tirent souvent profit pour troubler l'ordre et porter atteinte aux droits des citoyens.

La remarque, pouvons-nous ajouter, n'est pas particulière à l'Amérique, et il en est de même à Paris. Pour parer à ces inconvénients, il faudrait augmenter dans de très grandes proportions le nombre des agents; mais ce procédé est beaucoup moins économique que celui adopté à Chicago. Ce moyen consiste à faciliter et à rendre très rapide le système de police; pour cela chaque homme en patrouille ou en surveillance est mis en relation, en moins d'un instant, avec la subdivision à laquelle il est attaché, ou, si cela est nécessaire, avec le poste de police d'un district et même le poste central. Chaque citoyen notable

honorable peut aussi, en cas de besoin, appeler très rapidement la police en un temps très court.

Voici maintenant la réalisation pratique du système.

Des postes de police sont établis en certains points convenablement choisis de chaque district; à chaque poste est adjoint



Fig. 119. — Transmetteur des signaux pour les stations d'alarme à Chicago.

une voiture, un cheval et trois hommes toujours prêts à partir. La voiture porte un brancard, des couvertures et les objets nécessaires pour recevoir et soigner une personne malade ou blessée, recueillir un enfant perdu, arrêter les personnes accusées de crime, etc. Les postes de police sont en relation téléphonique avec des *stations d'alarme* publiques, semblables à des guérites, et distribuées le long des rues, de distance en distance. Ces guérites sont juste assez grandes pour renfermer un homme et lui servir de retraite à l'occasion.

Ces stations d'alarme s'ouvrent au moyen de clefs qu'on remet à tous les notables et honorables citoyens de la ville et à tous les

agents de police. Pour empêcher l'abus, les serrures des stations d'alarme sont disposées de telle sorte que l'on ne peut plus retirer la clef une fois qu'elle est engagée dans la serrure ; les agents de police seuls peuvent le faire. Comme chaque clef porte un numéro d'ordre et que le concours d'un agent de police est nécessaire,

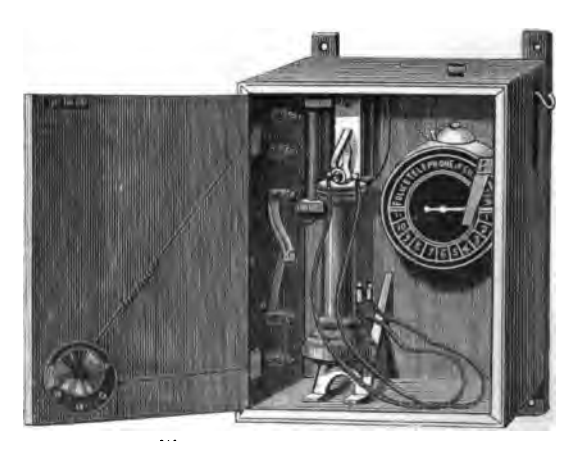


Fig. 120. — Boîte de téléphone des stations d'alarme.

la personne qui a donné l'alarme en ouvrant la guérite est ainsi obligée de se faire connaître ; l'on évite de la sorte bien des dérangements inutiles, car les détenteurs ouvrent seulement lorsque le secours est nécessaire, et ne prodiguent pas les appels dans la crainte de se faire retirer la clef.

On voit déjà par là que chaque citoyen concourt, par ce moyen, à la surveillance générale et que les secours ne se font pas attendre.

Voici la série des manœuvres à effectuer. Dès que l'accident arrive, le citoyen le plus voisin possesseur d'une clef, se dirige vers la boîte d'alarme la plus rapprochée, l'ouvre et fait le signal, comme nous l'indiquerons un peu plus loin. Aussitôt une escouade de trois hommes avec une voiture et un cheval arrivent au point d'où vient le signal. Si l'agent de police de garde se trouve près de la guérite, il ouvre la boîte et com-

munique avec le poste de police à l'aide du téléphone qu'elle renferme.

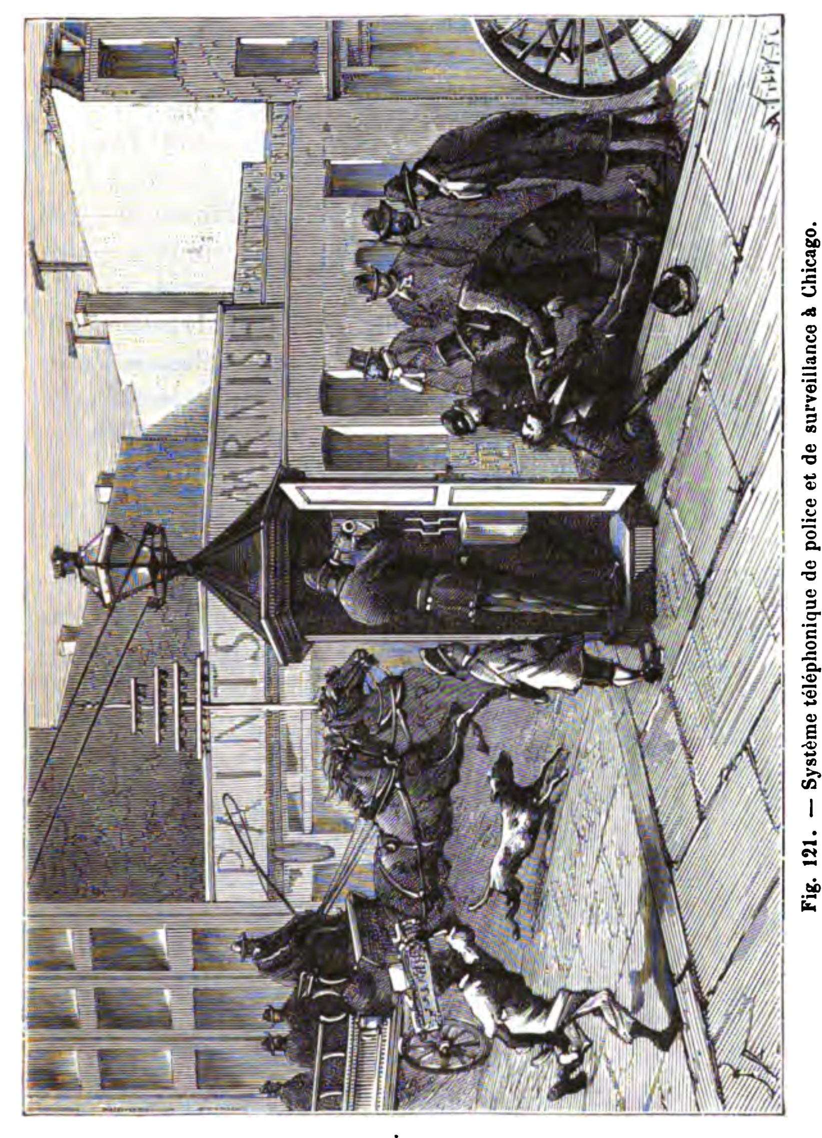


Fig. 121. — Système téléphonique de police et de surveillance à Chicago.
Voiture de police accourant au secours d'un blessé et guérite d'alarme dans laquelle on voit un agent parlant au poste de police pour donner les détails de l'accident.

Lorsque la guérite est ouverte par un citoyen, celui-ci fait

l'appel au moyen de l'appareil représenté séparément figure 119; cet appareil permet de transmettre *onze* indications différentes au poste central, en plaçant l'aiguille sur l'une ou l'autre, suivant la nature de l'alarme à donner. Voici ces indications :

1. *Voiture de police.* — 2. *Voleurs.* — 3. *Violences.* — 4. *Émeute.* — 5. *Ivrognes.* — 6. *Meurtre.* — 7. *Accident.* — 8. *Violation de domicile.* — 9. *Rixes.* — 10. *Essai de la ligne.* — 11. *Incendie.*

Pour donner un signal, l'appelant place l'aiguille sur le signal correspondant et appuie sur le levier représenté sur la droite de l'appareil (fig. 119). En lâchant le levier, l'appareil envoie au poste de police une dépêche conventionnelle indiquant le numéro du poste appelant et la nature de l'appel; le transmetteur est autokinétique; le récepteur est formé d'un télégraphe Morse ordinaire dont la bande est mise en marche automatiquement dès que le premier signal est envoyé.

La figure 120 montre la disposition de la boîte contenue dans la guérite; elle permet à l'agent de service de se placer en communication téléphonique avec le poste de police de son district pour des services ultérieurs. Le parleur à charbon est disposé sur le couvercle même et se trouve ainsi tout naturellement à portée de la bouche lorsque la boîte est ouverte.

La figure 121 représente le système fonctionnant à propos d'un accident; le signal a été donné et l'on voit arriver, sur la gauche du dessin, la voiture de secours, pendant qu'un agent placé dans la guérite d'alarme, explique au poste de police la nature de l'accident, son importance, etc.

Chaque heure ou chaque demi-heure, l'officier de ronde vient dans une des stations d'alarme et fait son rapport *téléphoniquement* au poste de police de son district, ce qui simplifie et facilite beaucoup le service. Le chef du poste peut ainsi diriger et régler son service sans dérangement.

Le système de Chicago comporte aussi l'installation, dans le domicile particulier de chaque habitation et dans les maisons d'affaires, de boîtes de signaux analogues, avec ou sans adjonc-

tion de téléphone. Dans ce dernier cas, les indications se donnent sur le cadran, comme pour les postes d'alarme. Le poste de police a une clef placée sous scellés ouvrant le domicile de chaque abonné. Lorsqu'un appel de nuit est fait, — pour vol avec effraction par exemple, — le policeman répond à l'appel en prenant la clef de l'appelant au poste de police, et peut ainsi venir aussitôt saisir le voleur.

Le système fonctionne pratiquement de la manière la plus satisfaisante; le nombre des arrestations dans le district où il est appliqué a été augmenté, ce qui a diminué le nombre des crimes dans une proportion correspondante. Le premier établissement est peu coûteux et son entretien peu dispendieux ; il paraît convenir plus spécialement dans les petites villes où le nombre des gardiens est relativement minime. A l'aide des boîtes d'alarme placées chez les particuliers et des stations d'alarme dans les rues, on peut appeler du secours en quelques instants et permettre ainsi à un nombre d'agents relativement restreint de rendre les mêmes services qu'une police nombreuse.

On voit par cette courte description du système d'alarme de Chicago, que l'initiative de chaque individu joue un rôle dans la sécurité générale et que tous contribuent au repos de chacun.

Un service de police organisé sur une base semblable pourrait-il fonctionner en France et y rendre de réels services ? La réputation de frivolité des Français permettrait d'en douter à première vue, mais en examinant le sujet de plus près, on peut affirmer que nous saurions vite apprécier la valeur pratique d'une semblable installation, et nous formons le vœu que le réseau téléphonique à Paris, aujourd'hui si important, soit bientôt complété par un réseau de police téléphonique analogue à celui de Chicago.

La sécurité des particuliers serait ainsi confiée, en partie du moins, à l'initiative privée ; nous nous permettons de croire qu'on ne saurait la placer dans de meilleures mains.

Application du téléphone et du microphone à la médecine et aux recherches scientifiques. — Un instrument

d'une délicatesse aussi merveilleuse que le téléphone devait recevoir et a effectivement reçu plusieurs applications dans les études médicales et physiologiques. Nous en citerons quelques-unes.

Microphone de M. Boudet de Paris appliqué à la médecine. — Une petite lame de caoutchouc durci de 5 sur 2 centimètres, très légèrement concave, et percée d'un orifice à son centre, sert de base à l'appareil (fig. 122). A l'une de ses extrémités s'élève une tige, haute de 3 centimètres environ ; sur cette tige monte et descend, au moyen d'une vis de réglage, un tout petit chariot de cuivre, entre les montants duquel oscille sur un axe transversal un cylindre de charbon D, long de 1 centimètre et demi et épais de 5 millimètres. Au-dessus de ce premier charbon vient aboutir l'extrémité libre d'une mince lame de ressort H, placée horizontalement et fixée par son autre bout à l'extrémité opposée de la planchette de caoutchouc. A ce ressort est adaptée une petite lentille de charbon, qui vient toucher l'extrémité du cylindre oscillant de charbon. Enfin, sous ce premier ressort et parallèlement à lui, comme dans le sphygmographe de M. Marey, se trouve un autre ressort terminé par un bouton explorateur, lequel traverse l'orifice de la planchette.

La moindre pression exercée sur ce bouton se transmet par l'intermédiaire des ressorts aux deux contacts de charbon, et fait ainsi varier l'intensité du courant qui les traverse. Ces variations sont recueillies par un téléphone que l'observateur applique à son oreille. La mobilité des deux charbons en contact fait comprendre l'extrême sensibilité de ce microphone. Toutefois, il est nécessaire, dans ces expériences, d'obtenir un premier degré de pression initiale, que la vis de réglage peut déjà donner en partie, puisqu'elle permet d'appuyer plus ou moins le cylindre oscillant de charbon sur la lentille inférieure. Mais ceci n'est pas suffisant, car, si l'on explore un pouls un peu ample, les mouvements communiqués aux ressorts soulèveraient brusquement le charbon supérieur et détermineraient des ruptures du courant.

M. Boudet a obvié à cet inconvénient en plaçant à l'intérieur

du petit chariot, au-dessus de l'une des extrémités du cylindre oscillant, un petit morceau de papier écolier I plié en forme de V et qui fait office de ressort. L'addition de ce ressort en papier présente plusieurs avantages ; le papier est un corps très faiblement et très parfaitement élastique, ainsi que l'ont prouvé les expériences de Savard ; par conséquent, il se prête beaucoup mieux que l'acier et le caoutchouc aux déplacements et aux rétablissements des contacts de charbons, ou plutôt aux variations de leur pression réciproque. Ainsi constitué, l'appareil, placé sur une



Fig. 122. — Microphone du Dr Boudet, de Paris.

artère, indique tous les bruits qui se passent à l'intérieur du vaisseau, et, avec un peu d'habitude, on arrive très aisément à distinguer les différences du rythme, les bruits de souffle, etc. La pulsation est très fortement accentuée, le dicrotisme normal devient perceptible, en un mot *on entend le tracé du pouls*, tel qu'il est inscrit par le sphygmographe. Appliqué sur un muscle, le même instrument devient un excellent *myophone.* Il décèle le bruit du tonus musculaire normal et, lors de la contraction, on

entend parfaitement le bruit de roulement caractéristique de ce phénomène.

MM. *Chardin* et *Prayer* ont construit aussi un explorateur micro-téléphonique destiné au sondage des plaies. Nous renvoyons nos lecteurs au n° 312 du journal *la Nature* (25 mai 1879) dans lequel cet appareil se trouve décrit.

Applications scientifiques du téléphone. — Nous ne pouvons décrire dans cet ouvrage toutes les applications scientifiques dont le téléphone et le microphone sont susceptibles, et les immenses services qu'ils ont déjà rendus. Citons entre mille la balance d'induction de M. Hughes auquel on doit l'invention du microphone. L'appareil a été décrit dans *la Nature* du 26 juillet 1879. MM. Hughes et Graham Bell ont appliqué récemment cet appareil à la recherche d'une blessure et à sa localisation.

M. *Carlo Resio* a appliqué le téléphone à la mesure de la torsion de l'arbre des machines en mouvement et a imaginé une très intéressante méthode permettant de mesurer le travail dépensé ou produit par un équilibre téléphonique. On trouvera tous les détails de cette intéressante application dans *la Lumière électrique* du 15 mars 1880.

Le téléphone appliqué à l'indication de courants électriques de très faible intensité. — Voici comment M. *d'Arsonval* décrit lui-même cette intéressante application :

« Le téléphone ne peut servir qu'à constater les variations d'un courant électrique, quelque faibles qu'elles soient, il est vrai, mais j'ai trouvé le moyen, par son intermédiaire, de constater la présence d'un courant continu, quelque faible qu'il puisse être. J'y ai réussi en employant un artifice très simple. Je lance dans le téléphone le courant supposé, et, pour obtenir des variations, j'interromps mécaniquement ce courant par un diapason. Si aucun courant ne traverse le téléphone, l'instrument reste muet. Si, au contraire, le plus faible courant existe, le téléphone vibre à l'unisson du diapason. »

Applications diverses. — Les applications que le télé-

phone a déjà reçues sont innombrables : plusieurs volumes comme celui-ci ne suffiraient pas à les décrire toutes. L'audiomètre ou sonomètre de M. Hughes, la balance d'induction, la mesure des résistances, les recherches sur les décharges électriques des piles de haute tension faites par M. Warren de la Rue, voilà pour les principales applications scientifiques du téléphone. Les communications téléphoniques dans les villes, les ateliers, les usines, la mesure de la torsion de l'arbre des machines en mouvement, l'analyse des métaux par la balance d'induction, constituent les principales applications industrielles.

On s'en est servi pour transmettre des discours, des conférences et des sermons, pour surprendre les conversations criminelles... des prisonniers, etc., etc.

Chaque jour voit naître une nouvelle expérience, un nouveau problème dans lequel le téléphone apporte un moyen d'investigation, un concours précieux, quelquefois même une solution. Dans d'autres cas, au contraire, son application fait naître des difficultés nouvelles ; les recherches faites pour s'en rendre maître profitent à la fois à la science et à ses applications. Nous en citerons un exemple.

Lorsqu'on a établi des réseaux téléphoniques dans les égouts, le rapprochement obligé des fils a été l'origine d'une difficulté sérieuse de nature à en compromettre le développement. Il s'agit de l'*induction* des fils les uns sur les autres, produisant un mélange des conversations et une cacophonie qui rend les conversations très difficiles.

Si, d'autre part, les fils téléphoniques se trouvent à côté des fils télégraphiques et que les lignes soient très développées, l'émission des signaux successifs produit sur les fils des téléphones des bruits qui rappellent à s'y méprendre le crépitement de la *friture* — c'est le nom adopté.

Cette difficulté a suscité bien des recherches et l'on a fait bien des propositions pour la vaincre. Bien que jusqu'ici on n'ait encore bien réussi que par l'emploi du double fil, on peut es-

pérer que d'autres solutions plus économiques donneront les mêmes résultats.

On voit par cet exemple combien la pratique du téléphone — qui est une pratique récente puisqu'elle ne date que de trois années à peine, — a déjà soulevé de questions techniques et scientifiques du plus grand intérêt.

Le développement qu'a pris le téléphone depuis sa découverte est unique dans les annales de la science : il prouve combien va grandissant le rôle de la science dans les progrès de la civilisation, et la portée immense des travaux de son illustre inventeur le professeur Graham Bell.

QUATRIÈME PARTIE

LES MOTEURS ÉLECTRIQUES.
LA TRANSMISSION DE LA FORCE A DISTANCE.
LA DISTRIBUTION DE L'ÉLECTRICITÉ.

La physique moderne a établi sur des bases désormais indiscutables l'*unité des forces physiques* et la *conservation de l'énergie*. Les phénomènes électriques et les transformations des effets électriques en effets calorifiques, mécaniques ou chimiques sont une preuve nouvelle de l'exactitude de ce principe.

Pour être complète, la quatrième partie de cet ouvrage, consacrée aux applications mécaniques de l'électricité, devrait aussi englober la *télégraphie*.

Il y a en effet une liaison beaucoup plus grande qu'on ne pourrait le croire tout d'abord entre la télégraphie et les effets mécaniques électriques. Un télégraphe Morse, par exemple, n'est autre chose qu'un moteur électrique mis en mouvement par une source placée souvent à une très grande distance et produisant, dans la plupart des cas, des mouvements mécaniques.

Dans le télégraphe *à cadran*, ce mouvement est un mouvement de *rotation*, mais *discontinu*. Il va sans dire que l'énergie mise en jeu est très faible et n'est utilisée qu'à la production de signaux et à la mise en mouvement d'appareils relativement délicats et très légers. Nous devrions donc commencer l'étude des

moteurs électriques par celle des télégraphes, mais comme un volume spécial de la *Bibliothèque de la Nature* sera prochainement consacré à cette étude spéciale, nous y renvoyons le lecteur ; la place nous aurait d'ailleurs fait défaut pour traiter la question, même d'une façon succincte. Nous ne nous occuperons donc ici que des moteurs électriques et des transmissions de forces à distance dans lesquelles on cherche à produire non plus des signaux et des actions discontinues, mais un *travail continu* et d'une certaine importance.

LES MOTEURS ÉLECTRIQUES.

Lorsqu'on veut produire de la force motrice à l'aide d'un moteur électrique, il faut d'abord s'occuper de produire l'électricité, et en second lieu envoyer cette électricité dans un *récepteur* qui la transforme en force motrice. Ce sont donc deux questions qu'il faut examiner séparément.

Les sources d'électricité. — On n'a pas pu songer à la création d'un moteur électrique pouvant produire un travail appréciable avant l'invention de la pile de *Grove*, sous réserve de quelques tentatives antérieures dont nous parlerons tout à l'heure. La mémorable expérience de *Jacobi* faite sur la Néva, en 1839, avec une pile Grove de 120 éléments, montra qu'on pouvait produire électriquement une certaine quantité de travail. A cette époque on connaissait mal le rendement des piles et encore plus mal le mode d'utilisation et de transformation de l'énergie électrique en travail mécanique.

Aujourd'hui les nombreux travaux qui ont été faits sur les piles voltaïques permettent de déterminer exactement le travail maximum disponible d'un élément donné, et la fraction de ce travail utilisable, suivant les conditions relatives de la pile, du circuit et du moteur.

Une pile donnée peut être comparée à une chûte d'eau : elle fournit, comme cette dernière, un certain *volume* débité à une certaine *pression* pendant l'unité de temps. Le volume c'est la

quantité d'électricité que la pile peut fournir, la pression c'est sa force *électro-motrice*. Le travail *maximum* que peut fournir une chute d'eau pendant l'unité de temps est égal au produit du volume d'eau débité par la hauteur de chute. De même, le travail *maximum* que peut fournir une pile est égal au produit de la quantité d'électricité par la force électro-motrice.

Il y a donc déjà une limite théorique qu'on ne saurait dépasser, et encore bien moins atteindre, car il faut tenir compte des pertes de courant dans les conducteurs, de l'échauffement des fils, et du rendement du moteur, rendement qui varie avec sa vitesse, et qui modifie dans de très grandes proportions le rapport entre l'énergie électrique dépensée par la source et le travail mécanique produit. Ajoutons encore que la pile consomme un combustible très cher, le zinc, et qu'elle ne le consomme que très lentement.

Il en résulte que la pile considérée au point de vue de l'énergie électrique mise en jeu est très dispendieuse, très lourde et très encombrante. On s'explique maintenant pourquoi les moteurs électriques mis en mouvement par des piles, — quel qu'en soit le système, — n'ont pas donné jusqu'ici les résultats qu'on en attendait au début. Aussi les moteurs électriques alimentés par des piles n'ont-ils reçu jusqu'ici qu'un petit nombre d'applications, pour produire des forces ne dépassant pas quelques kilogrammètres.

Nous en citerons quelques cas.

Si l'on se sert des accumulateurs électriques comme source d'électricité, le problème se pose d'une manière différente.

Lorsqu'il s'agit de très petites forces fonctionnant à des intervalles irréguliers, avec de longs repos, et ne représentant, en somme, qu'une somme minime d'énergie, une machine à coudre, par exemple, il est possible d'employer les accumulateurs. Cent kilogrammes d'accumulateurs alimenteront une machine à coudre pendant une semaine, avec un travail moyen de deux à trois heures par jour. En chargeant ces accumulateurs avec des machines dynamo-électriques, et en les portant tout

chargés à domicile, on entrevoit un mode de fonctionnement, sinon économique, du moins acceptable, en attendant la distribution de l'électricité à domicile, dont nous parlerons plus loin. Les accumulateurs pourront aussi servir pour utiliser à volonté des forces naturelles variables à chaque instant comme le vent et les marées, ils joueront à la fois le rôle de réservoir et de régulateur. Mais il s'agit alors de transport et de distribution de force à distance, et non plus d'un moteur alimenté par une source électrique, et nous renvoyons l'examen de ce cas à la distribution de l'électricité.

Les moteurs électriques. — Si l'on en croit M. Figuier, la première tentative faite pour créer un moteur électrique remonte à l'année 1831 et est due à l'abbé *Salvator del Negro*, de Padoue. On ne connaissait à cette époque que les piles à un seul liquide, et le moteur de l'abbé del Negro n'a pas dû donner de bien grands résultats, ne fût-ce qu'à cause de l'inconstance de la source. L'invention de la pile de Grove, en 1839, en mettant entre les mains des chercheurs une source électrique relativement puissante, fut l'origine de nouvelles tentatives. L'expérience de *Jacobi* sur la Néva est la première en date. En 1840, MM. *Patterson* présentèrent à l'Académie des sciences un moteur électrique qui devait servir à l'impression d'un journal hebdomadaire, et qui ne servit en réalité à rien du tout. En 1842, un Anglais, *Davidson*, aurait, dit-on, fait marcher une locomotive de huit tonnes à une vitesse de huit kilomètres à l'heure sur la ligne d'Édimbourg à Glascow, mais la réalité de ce fait est aussi peu prouvée que l'annonce faite par *Page*, en 1850, d'un moteur pouvant produire cinq chevaux.

Un très grand nombre de moteurs imaginés depuis l'expérience de Page ont été décrits dans l'*Exposé des applications de l'électricité*, de M. du Moncel. Ces moteurs ne présentent d'ailleurs qu'un intérêt purement rétrospectif. En réalité, aucun d'eux n'a fourni un travail supérieur à *quatre* kilogrammètres ; on peut les considérer seulement comme des jouets électriques.

Aujourd'hui, grâce à une étude plus complète des phénomènes

qui se produisent dans le fonctionnement des moteurs, on est arrivé à les perfectionner, à les simplifier et à augmenter beaucoup leur rendement.

Ainsi, par exemple, on a fait disparaître les moteurs à mouvements de va-et-vient qui se prêtaient assez mal aux grandes vitesses. Les moteurs électriques modernes sont tous *rotatifs*.

Pour les petites puissances, la partie mobile est une bobine Siemens en double T ; dès qu'il s'agit de produire plus de dix kilogrammètres, on emploie avec plus d'avantages les machines dynamo-électriques à courants continus.

Moteur électrique de M. Marcel Deprez. — L'appareil

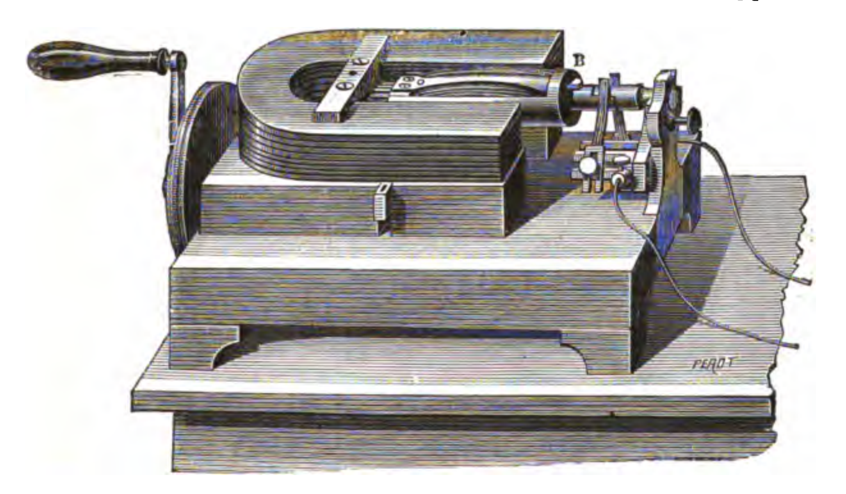


Fig. 123. — Moteur maguéto-électrique de M. Marcel Deprez.

représenté figure 123 n'est autre chose qu'une bobine de Siemens se mouvant entre les branches d'un aimant. En disposant la bobine longitudinalement entre les branches de l'aimant au lieu de la placer transversalement, comme le faisait M. Siemens dans ses machines, M. Deprez utilise toute la puissance de l'aimant et rend le moteur plus léger et moins coûteux à puissance égale. Le courant de la source arrive aux coquilles du commutateur par deux balais formés de fils de laiton très fins comme dans la machine Gramme. Le courant qui traverse la bobine change à

chaque demi-tour, au moment où les pôles qu'il détermine passent devant ceux de l'aimant. Les pôles de même nom se repoussent, ceux de nom contraire s'attirent et la bobine prend un mouvement de rotation dépendant du sens du courant qui la traverse. Les balais sont montés sur un support pourvant tourner autour de l'axe de la bobine. On peut changer ainsi le calage du commutateur et la vitesse du moteur suivant l'effort qu'il doit produire. Le modèle de la figure 123 porte un aimant de 1700 grammes, la bobine pèse 400 grammes et le poids du moteur complet n'atteint pas quatre kilogrammes. A la vitesse de trois mille tours par minute, il développe 2, 5 kilogrammètres avec huit éléments Bunsen plats, modèle Ruhmkorff. Lorsque la vitesse tend à devenir trop grande, un petit ressort, en communication fixe par une de ses extrémités avec un des bouts du fil de la bobine et venant s'appuyer par son autre extrémité sur une des coquilles du commutateur, s'écarte par l'effet de la force centrifuge. Le circuit est rompu et reste ouvert jusqu'à ce que la vitesse redevienne normale. En pratique, les ruptures et les fermetures de circuit se produisent assez rapidement pour que les variations de vitesse ne dépassent pas $\frac{1}{700}$ de la vitesse normale.

Moteur de M. Trouvé. — Le moteur de M. Deprez est magnéto-électrique, celui de M. Trouvé est dynamo-électrique. La bobine Siemens se meut entre les branches d'un électro-aimant plat en U; les faces extérieures de la bobine sont un peu excentrées, ce qui a fait disparaître le point mort. M. Trouvé a disposé son moteur sur le gouvernail d'un petit canot: les cordes qui dirigent le gouvernail servent en même temps de conducteurs, le courant est fourni par une pile à treuil au bichromate de potasse placée au milieu du canot. L'hélice actionnée par le moteur est placée sur le gouvernail, et tourne avec lui, aussi le canot évolue-t-il avec la plus grande facilité.

Le moteur de M. Trouvé a été aussi appliqué par M. Journaux à une machine à coudre; il est alimenté par trois accumulateurs Faure.

Le moteur (fig. 124) est placé verticalement; son arbre porte

une poulie garnie de caoutchouc qui s'applique contre le volant de la machine et l'entraîne. On règle la pression de la poulie contre le volant à l'aide d'un ressort. Pour rendre à la machine son indépendance, il suffit de manœuvrer un petit levier en

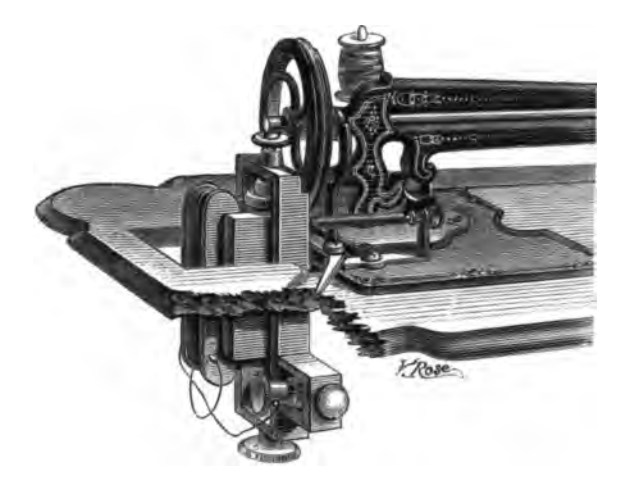


Fig. 124. — Moteur de M. Trouvé appliqué à une machine à coudre.

équerre qui éloigne le moteur, il n'y a plus alors contact entre la poulie et le volant, la machine peut marcher à la pédale, ce qui est fort utile si les accumulateurs ne sont plus chargés, pour une cause quelconque. Le commutateur pour la mise en marche et l'arrêt se manœuvre avec la pédale.

On règle la vitesse en exerçant une pression plus ou moins grande sur la même pédale. Cette pression a pour effet d'exercer une tension graduée sur une chaîne composée d'un certain nombre de maillons en argent, intercalée dans le circuit du moteur et de la source électrique. On obtient ainsi une série de contacts microphoniques dont la résistance plus ou moins grande influe sur l'intensité du courant et par suite sur la vitesse de la machine. Cette disposition ingénieuse est due à M. É. Reynier.

Moteur de M. Griscom. — Il a été spécialement combiné pour actionner des machines à coudre. Sa longueur ne dépasse pas 10 centimètres et son poids 1150 grammes.

Il se compose (fig. 125), en principe, d'une bobine de Siemens tournant entre les deux pôles d'un électro-aimant annulaire à points conséquents ; elle est ainsi entièrement renfermée dans l'inducteur qui la protège. Toutes les pièces sont en fonte malléable dont la force coercitive est aussi faible que celle du fer doux. Ce moteur se fixe très simplement sur toutes les machines déjà existantes à l'aide d'un petit support droit ou en équerre et un petit écrou à oreille placé à la partie inférieure.

Le générateur électrique employé par M. Griscom est une pile au bichromate de six éléments. La vitesse du moteur se règle en plongeant plus ou moins les éléments dans le liquide à l'aide d'une pédale placée sur le côté de la boîte qui contient les éléments : une seule charge suffit, d'après M. Griscom, pour effectuer de 500 à 1000 mètres de couture, soit en quinze jours, soit en six mois, à intervalles irréguliers.

Il serait trop long d'examiner tous les modèles de petits moteurs qui ont figuré à l'Exposition d'électricité. Jusqu'à nouvel ordre, le développement de leurs applications nous paraît entièrement subordonné à la distribution de l'électricité.

Les moteurs à bobines de Siemens et leurs modifications multiples peuvent rendre des services, lorsqu'il s'agit de produire des moteurs de faible puissance et d'une construction économique. Ils présentent cependant un inconvénient de nature à limiter leur emploi aux petites forces. Dans ces moteurs, le courant fourni par la source électrique n'est pas continu, il est interrompu au moment où le courant change de sens dans la bobine, ou bien, si les coquilles du commutateur sont très rapprochées, il s'établit une communication directe par les balais à chaque demi-tour plaçant ainsi la source électrique en *court circuit* et augmentant la dépense à l'instant même où elle ne produit pas de travail. Dans l'un et l'autre cas, la discontinuité d'action est défavorable au rendement, aussi tous les moteurs que nous avons signalés jusqu'ici sont-ils inférieurs, au point de vue du rendement, aux machines électro-dynamiques fonctionnant comme électro-moteurs.

L'avantage des machines dynamos ou continues sur les moteurs à bobine Siemens est d'ailleurs reconnu par tous à l'heure actuelle, et M. *Gramme* étudie des petits modèles de ses machines dynamo-électriques disposées spécialement pour la production de petites forces motrices.

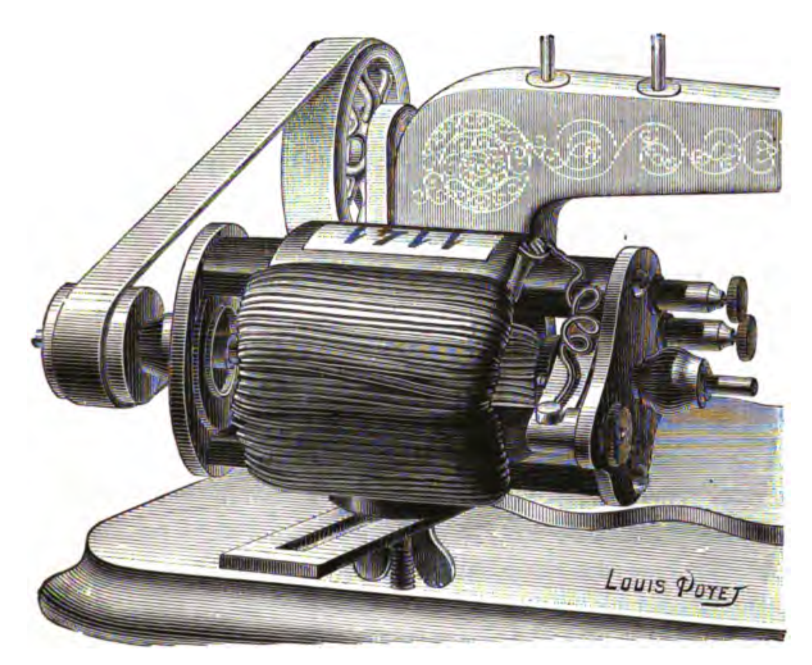


Fig. 125. — Moteur électrique de M. W. Griscom.

Réversibilité des machines électro-dynamiques. — Nous savons qu'en mettant en mouvement une machine électro-dynamique, elle produit un courant électrique. Inversement, si on fournit un courant électrique à une machine électro-dynamique, elle se mettra en mouvement.

Dans le premier cas, le travail se transforme en électricité, dans le second, c'est l'électricité qui se transforme en travail. On exprime ce fait en disant que les machines électro-dynamiques sont *réversibles*. Il en résulte que, puisque les machines dynamo-électriques à anneau de Gramme engendrent un courant *continu*,

elles dépenseront aussi un courant *continu* et se trouveront dans les meilleures conditions pour bien utiliser le courant fourni d'une façon *continue* par la source électrique.

Le principe de réversibilité, introduit par Carnot dans la science, a permis de réaliser la transmission de la force à distance par l'électricité dans des conditions de simplicité et d'économie dont on apprécie encore à peine les avantages.

LA TRANSMISSION DE LA FORCE A DISTANCE.

On a souvent intérêt à transmettre à distance une force produite en un point donné, soit pour l'apporter du point de production au point de consommation, soit pour la répartir en un certain nombre de points par portions égales ou inégales, soit enfin pour la distribuer d'une façon générale et l'utiliser à un grand nombre d'applications.

L'air comprimé, les canalisations de vapeur ou de gaz d'éclairage, les distributions d'eau, les câbles télédynaniques, les arbres de transmission dans les grands ateliers, résolvent en partie le problème dans des cas particuliers ou spéciaux ; aucun de ces modes de transport n'apporte une solution aussi générale que l'électricité qui, à l'aide d'organes d'une extrême simplicité, peut produire, suivant les besoins, de la chaleur, de la lumière, de la force motrice ou des actions chimiques.

Nous examinerons seulement ici le cas d'une transmission de force à distance et les applications dont la solution est susceptible. Les autres cas font partie de la distribution de l'électricité.

La transmission de la force à distance est fondée sur le principe de la *réversibilité* des machines magnéto et dynamo-électriques. Ce principe peut s'exprimer ainsi d'une façon simple :

Toute machine qui produit de l'électricité en dépensant du travail peut, inversement, produire du travail en dépensant de l'électricité.

Les applications du transport électrique de la force à distance

au labourage, à la traction des véhicules, à l'élévation des eaux, au percement des roches, à la mise en action des machines-outils dans les ateliers, etc., sont toutes fondées sur ce principe général. Toutes les machines à courants continus permettent d'effectuer ce transport, dans des conditions économiques qui dépendent des éléments de fonctionnement des machines, de la quantité de travail transmise, de la vitesse des machines, etc.

Pour fixer les idées, prenons le cas le plus simple, une machine magnéto-électrique génératrice, mise en mouvement à une vitesse *constante*, par un moteur hydraulique ou à vapeur, reliée par un conducteur à une seconde machine réceptrice fonctionnant comme *moteur*.

Supposons d'abord que la résistance du conducteur interposé soit négligeable, et augmentons-la par la pensée en éloignant le moteur. Le générateur développe une certaine force électro-motrice E. Le récepteur développe par sa rotation une force contre-électro-motrice E′, en sens inverse de celle du générateur. Ceci admis, on démontre que si on éloigne les deux machines, le rendement, c'est-à-dire le rapport entre le travail dépensé et le travail produit, est constant, quelle que soit la résistance du conducteur interposé. L'allongement du conducteur influe seulement sur la *quantité* de travail dépensée et la *quantité* de travail produite, sans changer leur rapport.

Pour transmettre à une distance plus grande la même somme de travail, il faut augmenter les forces électro-motrices des deux machines. En pratique on n'est limité que par l'isolement des fils sur les lignes et dans les machines.

M. *Marcel Deprez* a démontré qu'avec deux machines dynamo-électriques identiques, à fil fin, la première produisant une force électro-motrice de 7000 *volts* et dépensant une force de 16 chevaux, il serait possible de recueillir sur la seconde, à 50 kilomètres de distance, en employant comme conducteur un fil de fer de 4 millimètres de diamètre, une force de dix chevaux. Le rendement serait alors de 65 p. 100.

Plus récemment, M. *Maurice Lévy*, en étudiant les résistances relatives qu'il convient de donner aux deux machines est arrivé à un rendement de 75 p. 100 pour la même distance et la même force électro-motrice initiale du générateur.

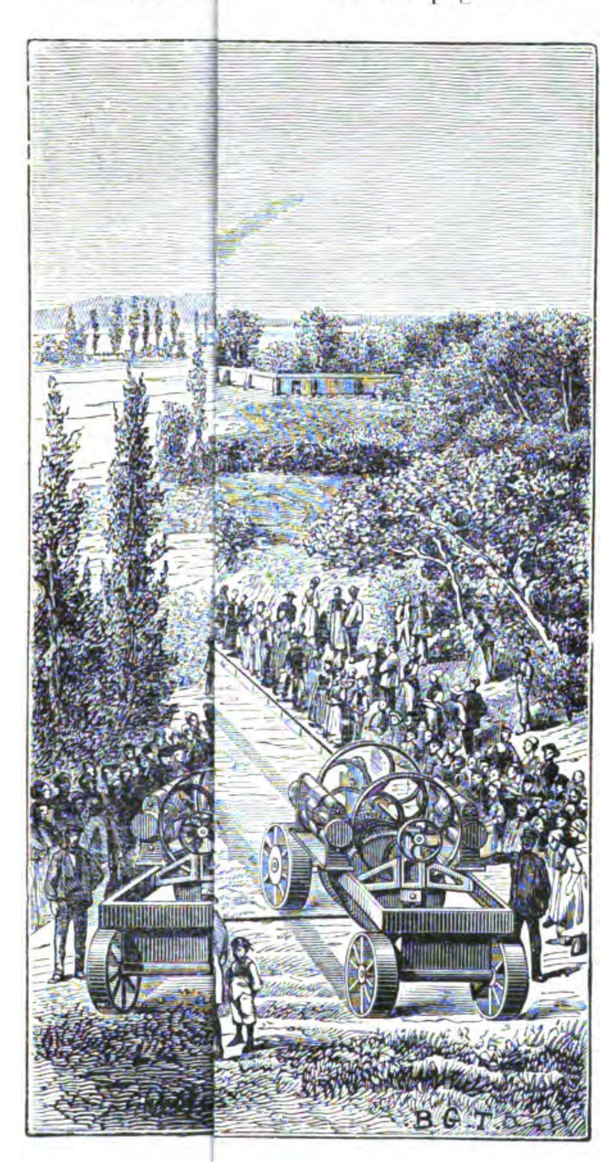
Il résulte de ces calculs que le transport électrique de la force à distance est réalisable aujourd'hui dans des conditions aussi économiques qu'on peut le désirer, et l'on ne tardera pas certainement à s'en servir pour l'utilisation des sources naturelles de travail inutilisées jusqu'ici.

Il ne s'agit pas encore, à notre avis, d'utiliser les chutes du Niagara, et de répandre le formidable travail qu'elles représentent sur une partie de l'Amérique ; mais réalisé dans des proportions plus modestes, le système de transmission des forces naturelles à distance par l'électricité rendra de sérieux services aux industries voisines des grandes chutes d'eau, des fleuves, des rivières, etc.

Les applications de l'électricité comme mode de transport de la force à distance ont précédé d'ailleurs de beaucoup l'idée de leur emploi à l'utilisation des forces naturelles. On s'en est servi déjà pour transporter à distance des forces produites en un point donné par un moteur à gaz ou à vapeur. Nous parlerons des plus importantes de ces applications.

Sans vouloir examiner ici à qui revient l'idée d'appliquer le principe de la réversibilité des générateurs électriques au transport de la force à distance, on peut certifier que la première application en a été faite par M. *H. Fontaine*, en 1873, à l'Exposition de Vienne, à l'aide de deux machines de Gramme dont l'une, le générateur, était actionnée par la transmission générale de l'Exposition, et dont l'autre, recevant le courant produit par la première, mettait en mouvement une pompe rotative placée dans l'annexe. D'autres applications furent ensuite faites dans l'atelier d'artillerie de Saint-Thomas d'Aquin, chez M. *Cadiat*, etc.

MM. *Chrétien et Félix*, se servirent en 1878 de machines Gramme pour décharger des bateaux et charger des wagons, la



79.

source électrique étant placée à 100 mètres de l'appareil de déchargement, etc.

Labourage électrique. — Cette application faite par MM. Chrétien et Félix a été expérimentée publiquement à Sermaize le 22 mai 1879; la planche IV représente les dispositions principales de cette intéressante expérience.

Deux treuils à quatre roues placés de chaque côté du champ à labourer reçoivent l'électricité de l'usine, fournie par des machines Gramme à l'aide de fils conducteurs.

Un commutateur envoie l'électricité tantôt à un treuil, tantôt à l'autre. Ces treuils sont mus chacun par deux machines Gramme; chacune d'elles présente une poulie enveloppée d'un anneau de caoutchouc qui presse contre un volant à surface polie et l'entraîne, la pression entre le volant et l'anneau est réglée par un ressort relié aux supports mobiles de la machine Gramme. Les treuils commandent tour à tour une charrue à quatre socs dont deux travaillent dans chaque sens, le câble de fils d'acier qui la tire s'enroulant d'un côté lorsqu'il se déroule de l'autre et inversement.

Lorsque le double sillon est tracé, les deux treuils sont déplacés en changeant, par un embrayage, la commande des machines Gramme qui agissent alors sur le train d'arrière du chariot.

On aura intérêt à appliquer ce procédé lorsque, comme dans l'usine électrique de M. Menier, à Noisiel, une chute d'eau fournira économiquement la force motrice, et qu'on voudra utiliser le travail mécanique disponible dans ces conditions au labourage et à tous les autres travaux d'agriculture. Aux environs de certaines usines, les sucreries par exemple, dans lesquelles les moteurs à vapeur chôment une grande partie de l'année, on aura aussi intérêt à employer le labourage électrique pour utiliser les moteurs. Dans le cas où l'installation des machines serait spéciale à ces applications, l'avantage, possible dans certains cas exceptionnels, nous paraît très problématique en général.

La traction électrique des chemins de fer aériens et souterrains dans les grandes villes. — La traction élec-

trique des chemins de fer dans les villes est étroitement liée à celle de la distribution de l'électricité à l'aide d'usines centrales convenablement réparties en certains points. Les premières expériences faites à Berlin, en 1879, par M. Werner Siemens montrent que la question est pratiquement résolue. Un projet d'établir un chemin de fer électrique traversant la ville de Berlin a été soumis à l'administration ; les raisons qui l'ont fait rejeter sont étrangères à la science. Le premier chemin de fer de démonstration a été construit à Berlin en 1879. La locomotive (fig. 126) remorquait trois petits wagons chargés de six personnes chacun. La

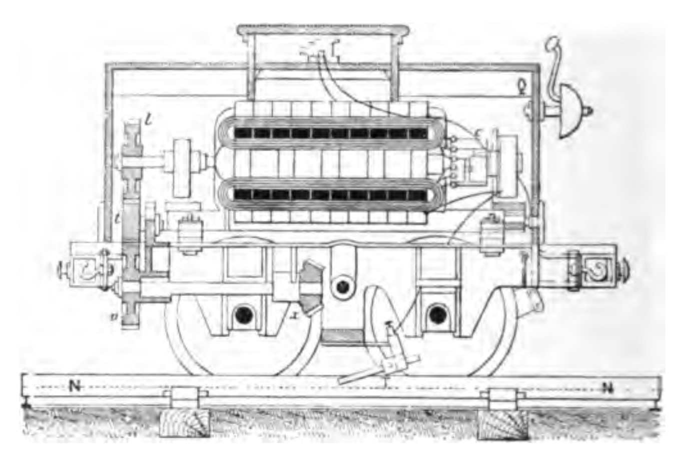


Fig. 126. — Coupe longitudinale de la locomotive du premier chemin de fer électrique ayant fonctionné à Berlin en 1879.

locomotive recevait le courant par un rail central isolé sur des traverses de bois et des balais composés de petits fils de cuivre placés sur le remorqueur et venant s'appliquer contre le rail central sur ses deux faces latérales. Ce rail est relié au pôle positif du générateur mis en mouvement par un moteur à vapeur, les rails ordinaires étant reliés au pôle positif.

La locomotive se compose d'une machine dynamo-électrique de Siemens transmettant le mouvement aux roues par une série d'engrenages (fig. 126) ; un commutateur à la portée de la main du conducteur assis sur la machine sert à la mise en marche et

à l'arrêt. A une vitesse de 3, 5 mètres par seconde, la locomotive produisait un travail effectif de trois chevaux.

Le premier petit chemin de fer établi à Berlin, a fonctionné ensuite en 1880, à l'Exposition de Bruxelles, puis à celle de Milan : il est installé actuellement au Palais de Cristal, à Londres.

Depuis le mois de mai 1881, il existe à Berlin un chemin de fer électrique plus important qui fait un service public entre Lichterfelde et l'école des Cadets, sur une longueur de plus de deux kilomètres. Le véhicule est une voiture automobile présentant l'aspect d'un tramway sans impériale et pouvant transporter 20 voyageurs.

La transmission du mouvement aux roues se fait à l'aide de poulies et de cordes en acier, le courant arrive à la machine par les rails et les roues, le véhicule se meut en avant ou en arrière indistinctement. La manœuvre se fait par un simple commutateur placé sous la main du conducteur avec le frein et le timbre à signaux. Une seule personne suffit pour percevoir le prix des places et manœuvrer l'appareil. La vitesse moyenne est de 15 kilomètres à l'heure, la vitesse maximum 20, mais il est possible de dépasser beaucoup cette vitesse.

On devine les avantages que présente la traction électrique sur la traction par machines à vapeur dans les grandes villes. La force étant produite par des machines fixes et puissantes coûtera moins cher qu'avec les locomotives, malgré les pertes inévitables causées par les conducteurs et les transformations.

La traction électrique se prête merveilleusement aux installations souterraines ou suspendues, car elle supprime radicalement la fumée, la vapeur, les escarbilles, la mauvaise odeur, l'insalubrité des tunnels si l'on est en souterrain, les dangers d'incendie si l'on est en chemin aérien.

L'électricité se prête ainsi à la traction des *tramways*, et l'Exposition d'électricité nous en a montré la première application.

Le frontispice de cet ouvrage représente le premier tramway électrique établi entre la place de la Concorde et le Palais de l'Industrie.

Les rails d'un tramway devant être disposés à fleur du sol ne peuvent servir de conducteurs. On ne peut même pas employer les rails comme fils de retour, car la boue en se collant aux rails et aux jantes des roues, isole électriquement le véhicule du conducteur. On a donc disposé sur le côté de la voie deux tubes en laiton de 22 millimètres de diamètre, suspendus à une certaine hauteur et soutenus par une série de poteaux. Ces deux tubes isolés entre eux communiquent avec les deux pôles de la machine génératrice. Ils sont fendus à la partie inférieure sur une largeur d'environ un centimètre.

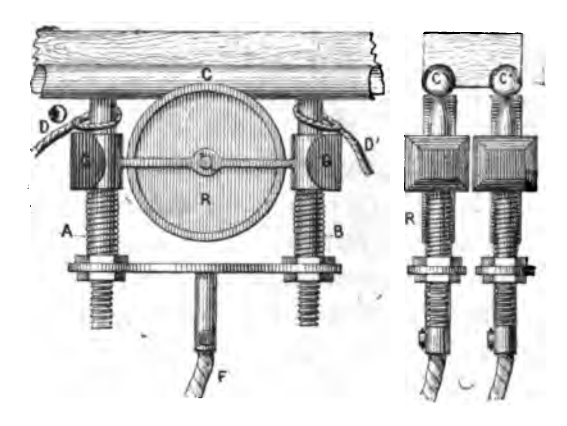


Fig. 127. — Chariot amenant le courant au tramway.

Dans ces tubes, glissent deux chariots identiques en communication avec la voiture à l'aide de conducteurs souples.

La figure 127 représente l'un de ces chariots. Il se compose d'un châssis rectangulaire portant en son milieu une roulette dont la gorge R est demi-cylindrique et vient s'appliquer contre la partie extérieure du tube conducteur C. Dans ce tube glisse un noyau cylindrique de 13 centimètres de longueur sur lequel sont fixées, à ses extrémités, deux tiges verticales A, B qui supportent la roulette ou galet. Deux ressorts poussent le galet contre le tube en s'appuyant sur ces tiges verticales et maintiennent un contact élastique entre le tube et le galet. Le chariot peut donc se déplacer; le galet *roule* contre le tube, le noyau *glisse* dans l'intérieur,

sans que la communication cesse d'être, sinon parfaite, du moins très suffisante pour la pratique. On aperçoit seulement de temps en temps quelques étincelles au moment où les chariots passent aux points d'assemblage des tuyaux ; ces étincelles sont dues à des

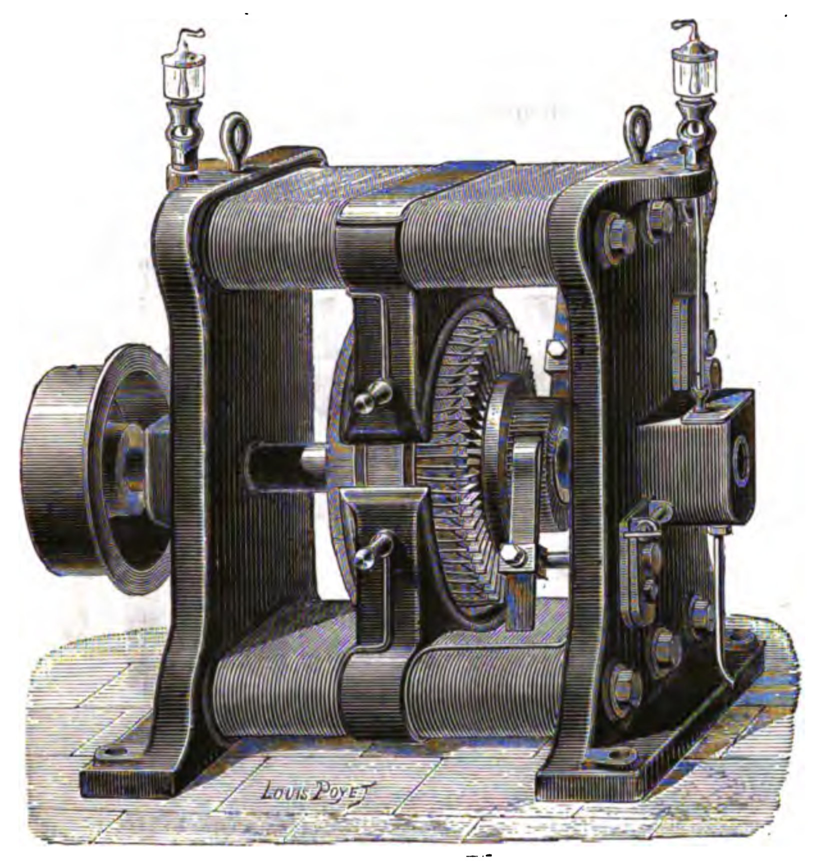


Fig. 128. — Machine Gramme pour lumière électrique et transport de force motrice à distance.

ressauts qui produisent des petites ruptures de courant instantanées sans importance pour le fonctionnement régulier du système. L'expérience montre que l'usure n'affecte presque pas les tubes et se reporte à peu près sur le noyau placé dans le tube, mais rien n'est plus facile que de remplacer ce noyau. Le courant

arrive à la machine de la voiture par le conducteur en cuivre F. La traction du chariot s'exerce par les cordes D ou D', suivant le sens de translation du véhicule.

Au point de vue des applications de la traction électrique dans les villes, les tramways électriques ne seront employés que dans

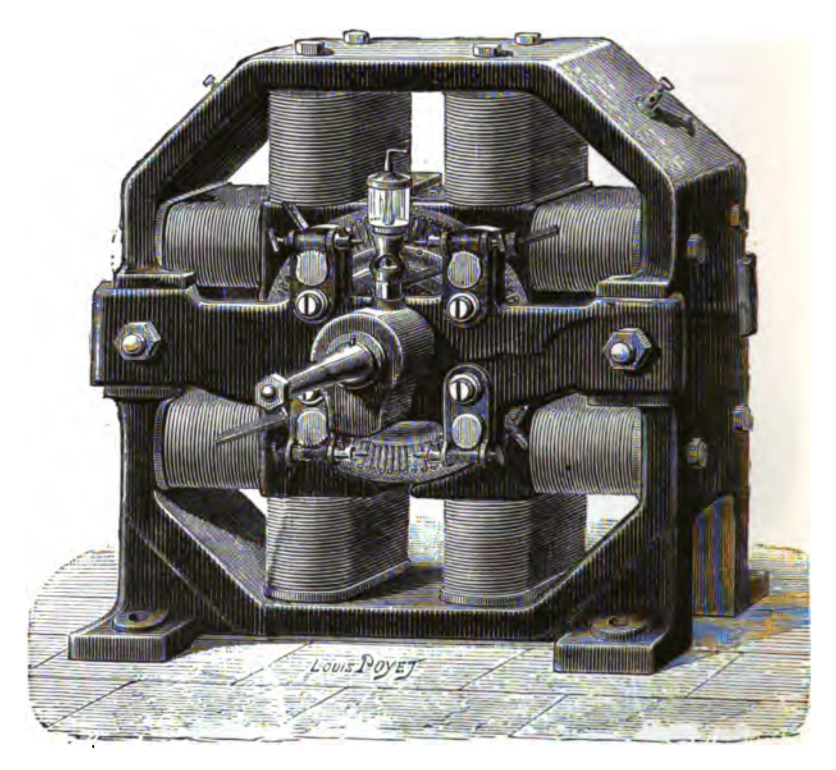


Fig. 129. — Machine Gramme pour le transport de la force à distance.

des cas très particuliers. On leur préférera presque toujours les chemins de fer suspendus qui ont l'avantage de dégager les voies et de diminuer leur encombrement partout où on les rétablira. Plusieurs projets sont étudiés dans ce but. Celui de M. Siemens, de Berlin, qui propose de placer les voies en bordure sur les trottoirs, et celui de M. Chrétien, qui propose de placer une voie double au milieu de la chaussée en la supportant de distance en

distance par des piliers, sont ceux qui présentent le plus de chance de succès dans les grandes villes où le développement du réseau des égouts, des tuyaux d'eau et de gaz, s'opposent à la création de chemins de fer souterrains.

Applications diverses. — Nous venons d'examiner rapidement deux applications importantes du transport de la force à distance : le labourage et la traction des chemins de fer dans les villes. L'Exposition nous en a montré plusieurs autres. Nous citerons le percement des roches, soit par percussion, soit par rotation, le havage pour l'exploitation des minerais et des carrières, l'élévation des eaux, à l'aide de pompes rotatives Greindl et Dumont, les ascenseurs électriques, la manœuvre à distance des ventilateurs installés pour l'aération des salles de téléphones, etc., etc.

Suivant la puissance à transmettre et la nature des travaux à effectuer, on modifie les formes et les dimensions des machines.

Les figures 128 et 129 représentent deux nouveaux types construits par M. Gramme pour répondre à des besoins divers. Le premier type (fig. 128), qui se prête aussi bien à l'éclairage qu'à la force motrice, est à inducteurs plats. Ses dispositions de détail ont été étudiées pour en faire une machine simple, rustique, facile à manœuvrer, à entretenir ou à remplacer.

Le second type (fig. 129), plus puissant, et qui est celui installé sur le *treuil* à labourage de M. Félix, se compose d'un cadre en fonte très solide servant de bâti et protégeant tous les organes contre les chocs extérieurs et les dislocations intérieures. La machine est à quatre pôles et à quatre balais. Elle pèse 500 kilogrammes et permet de transporter à distance une force utilisable de 5 à 8 chevaux.

En disposant deux ou quatre machines, on peut transporter ainsi quinze ou trente chevaux à plusieurs kilomètres de distance avec un rendement qui dépasse *pratiquement* 50 p. 100.

On peut donc dire dès aujourd'hui qu'il n'y a pas d'autre limite au transport de la force motrice à distance par l'électricité

que celle même des applications dont ce transport est susceptible.

La question se réduira dans chaque cas à un simple calcul pour déterminer s'il est plus économique d'aller recueillir une force motrice à distance produite à bon marché et l'amener au point de consommation, ou s'il vaut mieux, au contraire, la produire sur place à l'aide des moteurs connus.

LA DISTRIBUTION DE L'ÉLECTRICITÉ.

La variété infinie des applications auxquelles se prête si facilement le courant électrique donne chaque jour une importance plus grande à la question relativement nouvelle dont nous voulons présenter en quelques pages l'état actuel et l'avenir qui lui est réservé.

On sait avec quelle facilité l'énergie électrique produit, suivant les besoins, de la lumière, du travail, des effets chimiques et même de la chaleur, surtout les hautes températures.

S'il était possible de distribuer facilement à chacun cette énergie en quantités quelconques, utilisable à chaque instant et à volonté, comme on distribue aujourd'hui l'eau et le gaz, on verrait bientôt s'accroître avec une rapidité sans précédent dans l'histoire le nombre de ses applications. Le problème est cependant soluble, il est même résolu. On a d'abord formulé des ébauches de solution, puis des solutions plus parfaites, et enfin des solutions complètes, à la veille de recevoir une réalisation pratique sur une certaine échelle.

Qu'il nous soit permis de rappeler ici avec quelle incrédulité fut accueillie une conférence faite par l'auteur de ce livre sur *La distribution de l'électricité à domicile*, à la salle Pierre-Petit, le 23 mars 1879, à une époque où bien peu de physiciens croyaient à la réalisation d'idées aussi chimériques en apparence. Ce sera une preuve nouvelle de la marche rapide des progrès de la science électrique.

Dans le cas le plus général, le problème se résume à établir

une canalisation ou un *réseau* alimenté par une série de générateurs électriques répartis en différents points de la surface où doit s'effectuer la distribution et disposé de telle sorte que chacun des récepteurs électriques, lampes électriques, moteurs, sonneries, cuves galvanoplastiques, allumoirs, fourneaux électriques, etc., reçoivent chacun la quantité d'électricité qui leur convient à la pression électrique la plus convenable pour chaque appareil. La mise en service ou l'arrêt d'un nombre indéterminé et variable à chaque instant d'appareils récepteurs ne doit influer en aucune façon sur les éléments de circulation de tous les autres appareils en service.

Ce cas général correspond à celui où tous les appareils alimentés par le réseau fonctionnent avec des pressions électriques E et des intensités I différentes pour chacun d'eux.

Il n'existe pas, à notre connaissance, de système de distribution résolvant *directement* le problème ainsi posé dans le cas le plus général.

Certains artifices que nous indiquerons tout à l'heure permettent cependant d'y arriver.

Le cas le plus simple est celui à tous les appareils sont identiques c'est-à-dire fonctionnent sous le même volume et avec la même pression. Nous avons vu, à propos de la *division de la lumière*, plusieurs solutions de ce cas simple. Les lampes à arc voltaïque système Brush, Gramme, Siemens, Weston, Berjot, les lampes à incandescence Edison et Maxim, présentent des solutions partielles sur lesquelles nous n'avons pas à revenir.

Lorsque les dépenses d'énergie sont variables, il faut fournir à chaque appareil une quantité d'énergie électrique égale au produit du volume par la pression, c'est-à-dire égale à E I.

Cette quantité d'énergie électrique doit être variable avec chaque récepteur, mais constante pour chacun d'eux.

Le problème se simplifie en rendant l'un des deux facteurs constant et en faisant varier l'autre suivant les besoins. De là deux grands systèmes généraux de distribution :

1° Les distributions à *pression* constante ;

2° Les distributions à volume ou *intensité* constante.

Distributions à pression constante. — Supposons que par un procédé quelconque nous puissions maintenir entre deux points A et B une pression ou différence de potentiels constante. Nous pourrons brancher entre ces deux points un nombre indéterminé de circuits. Chacun d'eux sera traversé par un courant dont l'intensité sera exprimée par la formule de Ohm :

$$I = \frac{E}{R}.$$

E étant la différence de pression électrique entre les deux points A et B ; R étant la résistance du circuit [1].

Si, pour fixer les idées, nous supposons que la pression entre A et B soit de 100 *volts* par exemple, en introduisant une lampe à incandescence (R = 100 *ohms*) entre ces deux points, l'intensité du courant qui la traverse sera :

$$I = \frac{100}{100} = 1 \text{ ampère.}$$

Si nous plaçons au contraire une lampe à arc voltaïque dont la résistance totale soit seulement de 4 *ohms*, l'intensité du courant sera :

$$I = \frac{100}{4} = 25 \text{ ampères.}$$

La pression électrique sera la même dans les deux cas, mais la dépense d'énergie de l'arc sera 25 fois plus grande que celle de la lampe à incandescence, parce que l'intensité du courant est 25 fois plus grande. En maintenant la pression constante et en faisant varier convenablement la résistance des récepteurs, on a donc un moyen de faire varier le *débit* de chaque récepteur. Pour une sonnerie électrique, on branchera un électro-aimant à fil excessivement long et résistant, la dépense d'énergie sera

[1] Il y a lieu quelquefois de tenir compte de la force contre-électro-motrice développée dans le récepteur si c'est un moteur électrique, par exemple. Nous n'en parlons ici que pour mémoire, son introduction dans notre exposé de principe compliquerait l'explication.

alors très faible, et la sonnerie fonctionnera par le courant de la distribution générale.

Ce système suppose donc tous les appareils branchés *en dérivation* entre les deux points A et B maintenus à une différence de potentiel ou de pression électrique *constante*. En pratique, il n'est pas nécessaire de venir établir toutes les dérivations aux deux points A et B.

En combinant les résistances des appareils. et en établissant des conducteurs principaux partant de A et de B de dimensions suffisantes, on peut établir les branchements dérivés en deux points quelconques de ces conducteurs sans affecter trop sensiblement les résultats.

Le problème consiste à maintenir cette pression électrique constante entre les points A et B.

Les systèmes *Edison* et *Maxim* réalisent en partie ces conditions pour l'éclairage avec la lampe à incandescence.

Passons maintenant aux systèmes proposés pour une distribution *générale*.

Le plus rudimentaire est celui proposé par M. *Gravier* en avril 1880. M. Gravier n'emploie aucun mode de réglage du courant. Il excite une série de machines séparément et les monte toutes en quantité pour diminuer la résistance intérieure. La théorie indique, en effet, que si la résistance intérieure du ou des générateurs était nulle, on pourrait brancher sur ces générateurs un nombre indéfini de circuits et en modifier le nombre sans changer l'intensité de circulation dans les circuits restants. C'est là un procédé de distribution qui a fonctionné dans de bonnes conditions à l'Exposition d'électricité sur un nombre restreint de circuits, mais non pas une solution générale.

Dans un système complet de distribution que nous avons proposé au mois de septembre 1880, et qui n'a pu encore être réalisé pour des circonstances indépendantes de notre volonté, nous avons prévu et combiné une installation complète d'un véritable réseau de distribution, avec usines multiples et solidaires tendant toutes à maintenir, dans leurs limites de puissance res-

pectives, une différence de pression électrique utile constante. Le réglage porte à la fois sur la vitesse des générateurs électriques, celle des excitatrices, et sur les résistances des circuits d'excitation, ce qui donne au système une grande élasticité dans les cas où il faut donner *un coup de collier*, pour parer par exemple à de grands débits exceptionnels.

Enfin la dernière solution par pression constante est celle proposée par M. *Marcel Deprez*, il y a quelques mois, et réalisée à l'Exposition d'électricité pour distribuer l'énergie à une série de moteurs de différentes puissances. Dans le système fort ingénieux de M. Marcel Deprez, tout le mécanisme de réglage est supprimé; ce réglage s'effectue, automatiquement, instantanément par le fait même de l'introduction de nouvelles dérivations dans le circuit. A cet effet, les machines dynamo-électriques reliées entre elles en dérivation portent des inducteurs roulés avec deux fils distincts. L'un des fils est placé dans le circuit d'une machine excitatrice spéciale, l'autre est dans le circuit général. La puissance du champ magnétique dans lequel tournent les induits dépend donc à la fois du courant fixe fourni par l'excitatrice et du courant variable du circuit général. L'augmentation de ce courant à chaque dérivation nouvelle introduite dans le circuit augmente la force électro-motrice de la quantité nécessaire pour maintenir la pression électrique utile, parfaitement constante entre de certaines limites.

Cette solution élégante convient très bien dans le cas d'une seule usine de distribution; il reste maintenant à savoir comment le système se comportera dans un réseau de distribution général à usines multiples.

Distribution à intensité constante. — Le système à volume constant a été proposé pour la première fois par M. *G. Cabanellas* en décembre 1880. Dans ce système, tous les récepteurs sont placés les uns à la suite des autres sur le même circuit. Le courant général les traverse tous avec une intensité *constante;* le rôle du régulateur à l'usine centrale est de faire varier la force électro-motrice des générateurs pour

maintenir constante cette intensité. On conçoit, en effet, qu'il faudra moins de pression initiale lorsque le circuit sera court et que quelques appareils seulement seront intercalés, que lorsque tous les récepteurs seront en fonction. On conçoit aussi que les modes d'arrêt et de mise en marche d'un récepteur donné seront absolument inverses de ceux des systèmes par dérivation ou par pression constante. Dans l'un, on supprime un appareil du circuit en le rompant; dans l'autre, au contraire, cette opération

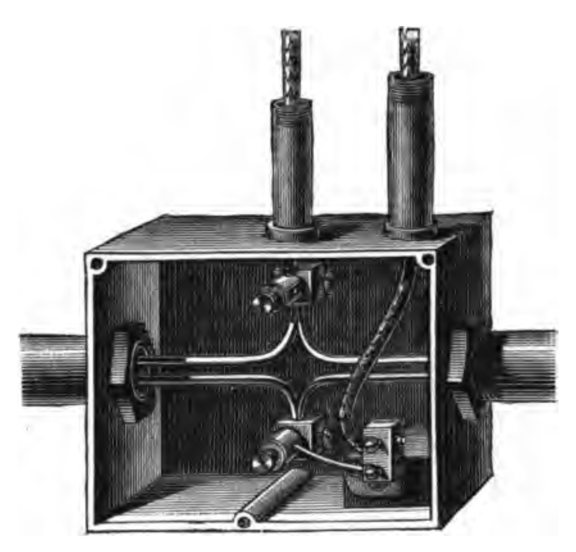


Fig. 130. — Boîte de branchement de conducteurs d'abonnés sur les conducteurs secondaires de distribution (système Edison).

se fait en établissant une communication directe entre les deux bornes, c'est-à-dire en plaçant le récepteur *en court circuit.* Le courant passe alors directement dans le fil par le court circuit — le *shunt* — ainsi établi, sans traverser le récepteur. A l'usine centrale, un mécanisme automatique introduit ou supprime des machines du circuit, suivant les besoins, pour augmenter ou diminuer la force électro-motrice initiale, en vertu de laquelle l'intensité générale se maintient constante. M. Cabanellas établit ainsi une série de boucles formant chacune un circuit unique et

fermé, allant de maison en maison, d'étage en étage, alimenter les divers appareils de la distribution. Chaque boucle a naturellement son réglage absolument indépendant de celui de toutes les autres.

Avantages et inconvénients des deux systèmes. — Le système à pression constante assure bien mieux l'indépendance des circuits, car les appareils ne sont aucunement solidaires comme dans le système à intensité constante où ils sont placés les uns à la suite des autres sur le même circuit.

En effet, le moindre accident arrivé aux conducteurs à un récepteur dans une boucle donnée prive de courant tous les récepteurs établis sur cette boucle. C'est là un écueil. Le système par pression constante permet de l'éviter, car chaque dérivation est absolument indépendante des autres. On a d'ailleurs imaginé des systèmes nombreux pour localiser les accidents qui pourraient se produire. Nous signalerons par exemple les conducteurs avec *boîte de sûreté* d'Edison. A chaque branchement d'abonné établi sur un conducteur primaire ou secondaire se trouve intercalée, dans le circuit, une lame ou un fil de plomb que traverse le courant fourni à l'abonné (fig. 130).

Si les fils établis chez l'abonné venaient à se toucher par accident, le courant tendrait à passer en grande partie par le chemin de courte résistance offert par ce contact, produirait une fusion, une détérioration des fils, peut-être un incendie, et en tout cas une perturbation dans la distribution. Grâce au petit conducteur en plomb interposé, dès que l'intensité du courant dépasse une certaine valeur, qui dépend de la grosseur des conducteurs qu'il s'agit de protéger, le fil de plomb fond sous l'action du courant et coupe automatiquement le circuit. L'abonné se trouve ainsi privé de courant, mais il n'en prive pas les autres, c'est là le point essentiel.

Le système à dérivation impose l'emploi de conducteurs relativement gros, surtout au point de départ des usines.

Les grosseurs de ces conducteurs devront être combinées, dès l'origine, d'après le nombre *probable* des dérivations à établir

pour ne pas être obligé de remanier la canalisation pour la proportionner à de nouveaux débits. Mais on pourra fonctionner avec des forces électro-motrices relativement faibles et par suite moins dangereuses et demandant une isolation des conducteurs moins parfaite que dans le système à intensité constante où les conducteurs chargés à un potentiel élevé constitueront une source permanente de danger.

Pour toutes ces raisons et d'autres qu'il serait trop long de développer ici, le système à intensité constante ne nous paraît pas répondre suffisamment aux besoins si divers d'une distribution d'électricité pour passer dans la pratique : l'avenir nous paraît réservé aux systèmes par pression constante.

Nous ne signalons que pour mémoire le conducteur-condensateur de M. *Parod* et le transport de l'électricité à domicile par des voitures dans des accumulateurs proposé par M. Philippart. Au prix où sont les transports dans les grandes villes, on peut juger à l'avance de l'avenir réservé à ce mode dernier d'exploitation de la distribution de l'électricité.

Transformateurs électriques. — Que l'on adopte le système par pression constante ou par volume constant, tous les appareils ne s'accommodent pas indifféremment de ce facteur constant imposé par les conditions mêmes de la distribution. Ainsi, par exemple, si l'on établit une distribution par pression constante, avec une chute utile de deux cents volts, cette chute initiale sera beaucoup trop grande pour alimenter un régulateur à arc voltaïque de moyenne puissance, elle sera aussi trop grande pour les dépôts électro-chimiques. Le courant fourni, étant continu, ne conviendra pas non plus pour alimenter des bougies Jablochkoff qui ne peuvent fonctionner qu'avec des courants alternatifs.

Tous les appareils qui permettent de changer les qualités ou la nature des courants fournis par une distribution pour les approprier aux exigences des récepteurs qu'ils doivent actionner sont des transformateurs.

L'accumulateur de M. Planté, la bobine de Ruhmkorff sont

des transformateurs. Nous les avons étudiés dans la première partie de cet ouvrage.

Nous voulons dire ici seulement quelques mots des transformateurs appliqués plus spécialement à une distribution d'électricité.

Robinet électrique de M. G. Cabanellas. — Concevons, chez un abonné à la distribution, un moteur électrique d'une certaine puissance alimenté par la distribution. Ce moteur électrique pourra actionner à son tour une machine génératrice d'électricité disposée dans des conditions spéciales et telles que, suivant les besoins, elle fournira un courant continu de grand volume pour les dépôts galvanoplastiques, ou un courant de haute tension pour les tubes de Geisslers, un courant alternatif pour les bougies Jablochkoff, etc. C'est là un transformateur auquel on ne peut reprocher qu'un défaut; la transformation se fait par l'intermédiaire du travail, il y a donc une perte assez sérieuse. Pour la diminuer, M. Cabanellas a imaginé d'autres transformateurs beaucoup plus simples dans lesquels on ne passe pas par cet intermédiaire coûteux et qui tiennent à la fois des machines dynamo-électriques et des bobines d'induction. Grâce aux *transformateurs*, quel que soit le mode de distribution adopté et les éléments de la distribution, il sera toujours possible d'alimenter un appareil récepteur *quelconque*, à la condition de dépenser dans le transformateur une quantité d'énergie électrique un peu supérieure à celle qui sera consommée par le récepteur.

Compteurs d'électricité. — Il est important de compter l'énergie électrique fournie à chaque consommateur, la seule qui soit réellement due. Dans le système à pression constante, il suffit de connaître la *quantité* d'électricité qui a traversé le circuit de chaque abonné. Cela est très facile en intercalant un voltamètre à sulfate de cuivre en dérivation sur deux points très rapprochés du conducteur. Il ne passe dans le voltamètre qu'une partie très faible du courant général. On peut d'ailleurs, par des résistances convenablement distribuées, gra-

duer ce rapport. En pesant le cuivre déposé sur une lame aux dépens de l'autre pendant un temps déterminé, un mois par exemple, on a tous les éléments pour déterminer la quantité d'énergie fournie à l'abonné et par suite pour le taxer d'une manière analogue à celle du gaz.

C'est le principe des appareils de *Sprague* et d'*Edison*. Ce dernier a construit un second compteur plus compliqué, mais qui dispense de la pesée des plaques, et plus récemment il a fait breveter un troisième système à moteur électrique et compteur totalisateur à engrenages. La vitesse de rotation étant proportionnée à l'intensité du courant, on a encore un moyen de mesurer l'électricité fournie à l'abonné.

Nous avons dû passer rapidement sur une foule de problèmes intéressants que soulève la distribution de l'électricité à domicile et son application à tous les usages. L'énumération seule de ses applications remplirait plusieurs pages. Nous avons voulu seulement montrer que la question est mûre et qu'aucun point ne soulève de difficultés insurmontables.

Dans quelques années l'électricité aura pénétré dans nos habitations, apportant à chacun de nouveaux et innombrables éléments de bien-être en rapport avec les besoins toujours croissants de la civilisation moderne. Le dix-neuvième siècle ne se terminera pas sans voir le développement complet des applications de l'électricité et sa distribution à domicile : nos petits-enfants, en témoignage de reconnaissance à l'égard des progrès d'une science née avec le siècle, pourront alors le nommer à juste titre : LE SIÈCLE DE LA VAPEUR ET DE L'ÉLECTRICITÉ.

TABLE DES MATIÈRES

3828-81. — Corbeil. Typ. et stér. Crété.



